现代信息管理与信息系统系列教材

系统工程

——方法与应用

XITONG GONGCHENG

——FANGFA YU YINGYONG

唐幼纯　范君晖／主　编

李红艳　高圣国／副主编

清华大学出版社

现代信息管理与信息系统系列教材

系统工程

——方法与应用

XITONG GONGCHENG

—FANGFA YU YINGYONG

- 信息资源管理
- 系统工程——方法与应用
- 运筹学
- Java语言编程实践教程
- 信息系统分析与设计
- 数据结构与程序设计
- 数据库系统原理及应用
- 电子商务——理论与实践
- 管理信息系统——理论与实践

ISBN 978-7-302-23476-0



定价：27.00元

现代信息管理与信息系统系列教材

上海市第四期教育高地（信息管理与信息系统）建设成果

系统工程

——方法与应用

XITONG GONGCHENG

—FANGFA YU YINGYONG

唐幼纯　范君晖／主　编

李红艳　高圣国／副主编

清华大学出版社

北　京



内容简介

本书力求将系统工程方法论精心设计到系统性问题的解决过程中，从系统问题的提出、解决问题的目的分析、实现目标的系统方案（模型）设计、系统模型构建到系统模型结果分析，深入浅出地介绍了如何用系统的思想认识社会、经济、管理等系统性问题，以系统结构分析方法、系统模型方法、系统评价模型、系统仿真模型、系统预测模型为主要内容，将系统工程的思想和方法论渗透到解决问题的过程中。本书通过积累丰富的例子加以说明方法的运用，使得系统工程内容不再枯燥繁杂，而变得深入浅出、通俗易懂。

本书不但适用于管理、工程类专业的学生和研究生研读，还可以作为相关人员的培训教材和自学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

系统工程：方法与应用/唐幼纯等主编. --北京：清华大学出版社，2011.1
现代信息管理与信息系统系列教材
ISBN 978-7-302-23476-0

Ⅰ.①系…　Ⅱ.①唐…　Ⅲ.①系统工程　Ⅳ.①N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 155039 号

责任编辑：刘志彬
责任校对：王荣静
责任印制：王秀菊

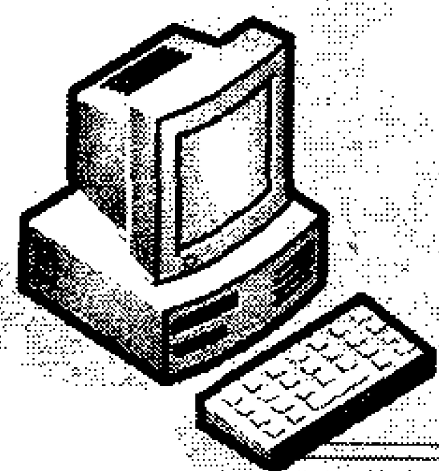
出版发行：清华大学出版社　　**地　址**：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　　**邮　编**：100084
社　总　机：010-62770175　　**邮　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质　量　反　馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 刷 者：北京市季蜂印刷有限公司
装 订 者：三河市金元印装有限公司
经　销：全国新华书店
开　本：185×230　　**印　张**：13.25　　**字　数**：271 千字
版　次：2011 年 1 月第 1 版　　**印　次**：2011 年 1 月第 1 次印刷
印　数：1～4000
定　价：27.00 元

产品编号：038541-01



丛书编委会





总 序

作为一种资源,信息是人类智慧的结晶和财富,是社会进步、经济与科技发展的源泉。信息同物质、能源一起,成为现代科学技术的三大支柱:物质为人类提供材料,能源向人类提供动力,而信息为人类奉献知识和智慧。

在人类发展史上,还没有哪种技术能够像信息技术这样对人类社会产生如此广泛而深远的影响。而现代信息技术,特别是采用电子技术来开发与利用信息是时代的需要,是世界性潮流、是人类社会发展的必然趋势,并正以空前的速度向前发展。

环顾当今世界,几乎每个国家都把信息技术视为促进经济增长、维护国家利益和实现社会可持续发展的最重要的手段,信息技术已成为衡量一个国家的综合国力和国家竞争实力的关键因素。

在国内,随着信息化建设的进一步深化,特别是电子商务和电子政务的兴起,社会各界对于信息管理人才的需求越来越多,要求也越来越高。这表明,"信息管理与信息系统"作为管理科学的一个重要分支,已经成为信息时代人才培养不可缺少的一个重要方面。

作为上海市优秀教学团队,上海工程技术大学信息管理与信息系统专业教师队伍在学科建设中,秉承面向国际、面向服务国家和地区经济建设的宗旨,坚持教学与研究相结合、理论与实践相结合,在近20年的专业建设中取得了一系列丰硕的教学与研究结果。

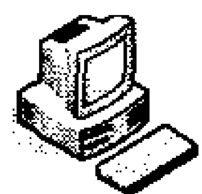
为了使读者进一步掌握信息管理理论和技术,也为了让研究成果更好地服务于社会,我们组织了一批长期从事信息管理与信息系统教学和研究的教师撰写了本系列教材。

本着培养"宽口径、厚基础、重应用、高素质"德才兼备、一专多能的信息管理类人才的原则,本系列教材以理论与实践相结合,注重系统性、基础性,突出应用性作为编写理念。因此,体现出以下三个方面的特点:

(1) 构建与人才培养目标相适应的教材体系。

教材建设的关键在于构建与人才培养目标相适应的知识内容体系。作为21世纪信息管理与信息系统专业的教材必须适应"以信息化带动工业化"的国家发展战略,以运筹学、系统工程等管理科学为研究方法,以计算机科学与技术为支持工具,构建培养读者掌握企业实施管理信息化所必需的知识体系。

本系列教材密切结合我国社会主义市场经济的发展对人才的需要,紧跟时代的发展,



不断补充和引进新的教学内容，增加信息技术方面的最新进展，紧紧围绕上述培养目标建设面向21世纪的信息管理与信息系统专业课程体系，并在此基础上进行教材体系的建设。

(2) 重视理论体系架构的完整性和鲜明性。

本系列教材可以使读者了解信息管理过程中，各个环节所应用的信息技术，了解信息管理系统的规划、开发和管理的内容，从而体会到信息管理的三大支撑学科——经济学、管理学和计算机科学在信息技术和信息系统所实现的信息管理中的内在联系和作用。

本系列教材由三个层次模块的教材组成，三个层次模块既有本身的核心知识内容，又紧密联系，形成了知识结构系统性的特点。其中：

- 信息管理的基础理论模块，如《信息资源管理》、《系统工程——方法应用》、《运筹学》等；
- 信息管理的技术模块，如《Java语言编程实践教程》、《信息系统分析与设计》、《数据结构与程序设计》、《数据库系统原理及应用》等；
- 信息管理的应用模块，如《电子商务》、《管理信息系统理论与实践》等。

(3) 体现专业知识内容的应用性。

本系列教材强调理论联系实际，充分结合信息技术的实践和我国信息化的实际，注重理论的实际运用，全面提升"知识"与"能力"。在教材编写的过程中，教材案例编排的逻辑关系清晰，应用广泛，针对性强。本系列教材在注重理论与实践相结合的同时，也提高了实际应用的可操作性。

本套教材内容丰富，信息量大，章节结构符合教学需要和计算机用户的学习习惯。每章的开始，列出了"学习目标"和"本章重点"，便于读者提纲挈领地掌握各章知识点，每章的最后还附有"案例分析"和"习题"两部分内容，教师可以参照上机练习，实时指导学生进行上机操作，使学生及时巩固所学知识。

丛书编著做到了专业知识体系框架完整。在内容安排上，各教材内容广泛汲取了同类教材的精华，借鉴了本领域内众多专家和学者的观点和见解。

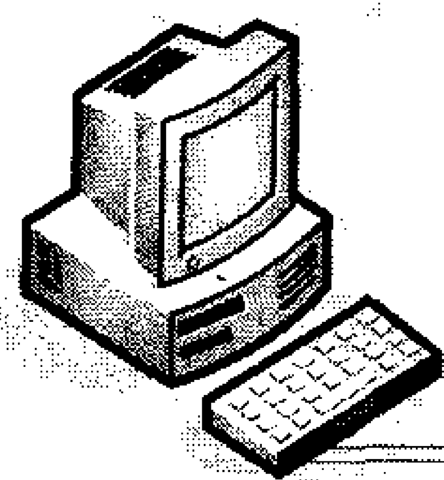
本套丛书在编写过程中参阅了大量的中外文参考书和文献资料，在此向国内外有关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平和时间所限，如有错误和遗漏之处，敬请读者提出宝贵意见。

汪　泓

2010年4月

于上海工程技术大学



前 言

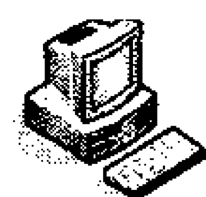
“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。”(钱学森)因此，对工程、管理各领域人员，树立系统工程的思想，运用系统工程的方法，解决工程、管理等系统性问题，将具有十分重要的意义。

系统工程是一门学科交叉的工程技术，它从系统的观点出发，立足整体，将自然科学和社会科学中的思想和方法有机地结合起来，采取定量和定性相结合的方法，为现代科学技术的发展提供新思路，并且从系统性问题的提出到系统性问题的解决这样一个过程本身就是系统工程方法论的实践。

本书以系统工程的应用案例为主线，全面系统地讲述了系统工程方法与应用。第1章主要介绍系统工程的概念和特点、系统工程在社会实践中的应用；第2章介绍系统的概念，描述系统的方法，系统解释结构模型方法；第3章介绍霍尔(Hall)硬系统方法论、切克兰德软系统方法论、综合集成方法论和物理-事理-人理系统方法论，它们各自的特点及思维方式，并从逻辑维展开介绍Hall的硬系统方法论；第4章主要讲述系统模型的概念、层次分析模型方法；第5章介绍系统评价概述、模糊综合方法、主成分方法及其应用；第6章介绍系统仿真的特点和作用、MC仿真方法和应用；第7章介绍系统动力学的应用对象和表示方法、系统动力学的建模步骤；第8章讲述系统预测方法的分类，神经网络预测模型的特点、工作原理以及应用。

本书的大部分内容是在作者为管理学院、文理学院系统工程专业本科生及研究生开设的系统工程课程的讲义基础上，进一步修改后编著的。本书积累了作者多年的教学经验，收集了大量的社会、经济、管理等系统工程实践应用案例，对系统工程难以解析的概念、方法给予了清晰的演绎。明晰概念、简述方法、指导应用为本书的特点奠定了基础。本书不但适用于管理、工程类专业的学生和研究生研读，还可以作为相关人员的培训教材和自学参考书。

本书由上海工程技术大学唐幼纯、范君晖主编。具体分工是：第1～3章由唐幼纯、范君晖编写，第4、5章由唐幼纯编写，第6、7章由唐幼纯、范君晖编写，第8章由唐幼纯、李红艳、高圣国编写。



本书在编写过程中，参阅并吸收了大量资料和公开发表的有关人员的研究成果，在此对他们的工作、贡献表示衷心的感谢。

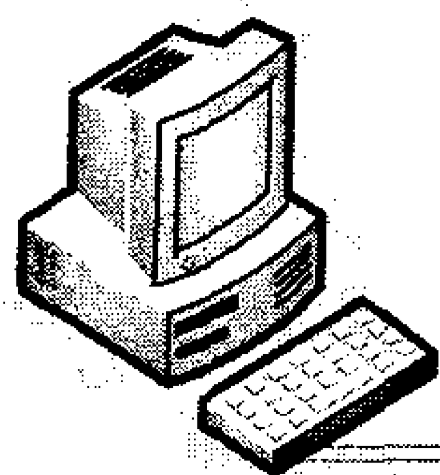
由于系统工程涉及面非常广泛，又是一门不断发展着的交叉学科，限于我们水平有限，编写时间较紧，书中错误或疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编　者

2010 年 4 月

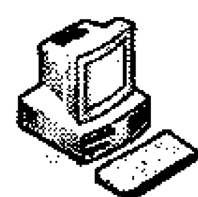




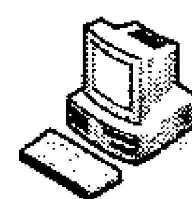


目 录

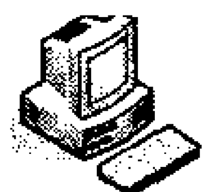


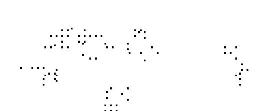




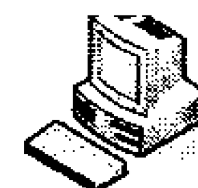




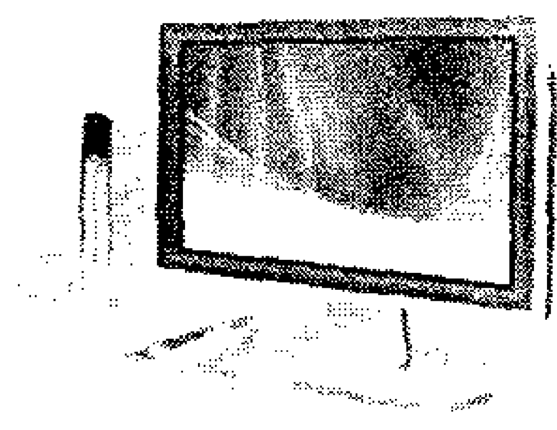












第1章 系统科学与系统工程

本章关键词

系统科学(system science)　系统工程(system engineering)

本章要点

系统工程是系统科学的第四个层面,即系统科学的应用领域。在越来越注重学科应用的社会发展环境下,了解系统科学对学生系统工程课程的学习具有重要的指导意义。

系统工程是组织管理系统的规划、研究、制造、试验和使用,并对所有系统都具有普遍意义的科学方法。因此理解系统工程的概念和特点、了解系统工程在社会实践中的应用可以激发学生学习系统工程的兴趣。

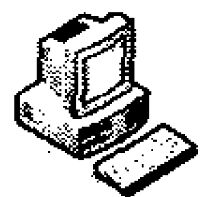
1.1 系统科学概述

现今科学迅猛发展,使得学科的界限分割越来越不明显,学科融合、学科渗透、学科交叉,呈现出大科学、大学科态势,因此当今的科学又称为系统科学。系统工程与系统科学有什么关系?系统工程在当今系统科学态势下有什么作用?在此有必要对系统科学的概念有所认识。

1.1.1 系统科学的概念

系统科学是多维的、交叉的(横跨自然科学、社会科学和工程技术)、综合的,作为现代科学技术体系中的一个大部门的新兴学科。

为了更好地理解系统科学,先来看看传统科学的概念。所谓传统科学,是指研究特定物质运动形式中的特殊矛盾的科学。例如,传统机械学研究机械物质在运动形式中产生的作用力和反作用力;传统军事学则以军事活动为对象,研究攻击和防御的战略战术;黑格尔认为哲学是一种特殊的思维运动,是对绝对的追求,他在《小逻辑》一书中指出,"哲学以绝对为对象,是一种特殊的思维方式";唯物论和唯心论是传统哲学研究的一对矛盾体。从这些传统科学的定义中可以看到,传统科学是以"事物"为主题进行研究的。



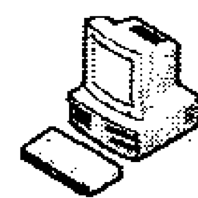
系统科学既不专门研究自然界中某一特定物质运动形式中的特殊矛盾，也不专门研究社会现象的某一侧面，而是研究横贯于宇宙间一切物质运动形式中的某些共性现象。所谓共性现象，我们用数学中的同构问题来说明。微积分学中的积分方法可以解决不同系统的同构问题，包括曲边梯形的面积问题、变速直线运动的路程问题等。在对所有可以研究的问题进行分析之后，发现它们之间存在的数学结构一致性，于是抽去几何、物理等实体意义，寻找共性，得到所有这一类问题可以归结为求一个和式的极限 $\int_a^b f(x)\mathrm{d}x$ 问题。如果 $f(x)$ 是曲线，则 $\int_a^b f(x)\mathrm{d}x$ 表示几何系统中的面积；如果 $f(x)$ 表示速度函数，则 $\int_a^b f(x)\mathrm{d}x$ 表示物理系统中的路程。信息论是研究在信息系统中普遍存在着的信息传递的共同规律，以及如何提高各信息传输系统的有效性和可靠性的一门理论；控制论则是研究系统的状态、功能、行为方式及变动趋势，控制系统的稳定，揭示不同系统的共同控制规律，使系统按预定目标运行的技术科学。因此，系统科学是以“关系”为主题，研究不同领域各系统之间的同构性和一致性问题，即研究系统的结构关系。

将传统科学与系统科学放在一个二维坐标系中，则传统科学是以知识的“事物”主题为横坐标和纵坐标，系统科学则在坐标平面中以知识的“关系”为研究主题，即以“事物”为问题，用系统科学方法解决“事物”的结构关系。

1.1.2 系统科学研究的问题

“问题”是任何理论和方法研究的起点和归宿。随着人类社会对美好的不断追求，而满足美好的社会资源有限，从而必定产生问题，且人们对美好的需求越强烈问题就越复杂。例如“运输”问题，如果运输的对象确定，运输的工具满足，即运输的条件全部具备，则这只是一件事情而非问题；如果运输的路线需要选择，比如按照成本最低选择运输路程，或按照路程最短选择运输路程，或按照时间最快选择运输路程，则这时的“运输”就是问题了，且问题随着选择的条件（就是限制条件）越多变得越复杂，承担的风险也越大。当然，人类社会也正是因为不断产生的问题得到解决而发展的。

科学技术发展迅猛，促使系统发展面临着科学技术的快速进步，社会生产的物质、能量、信息按指数曲线急剧增长；网络时代的来临使得“地球变得越来越小”，空间、距离不再能够束缚人们，宇宙中各种事物之间的联系空前增强；系统元素数量增多、规模扩大与管理水平之间的矛盾日益尖锐，形成了管理差距；环境对系统的影响及交互作用越来越明显。由此产生的“问题”呈现出时间性、空间性和层次性等特点，形成了“系统性问题”。下面的例子可以帮助我们进一步理解什么是“系统性问题”。例如，“人才培养”问题包括人才的素质培养、人才的道德培养、人才的智育培养等。这些问题之间存在着相互制约、相互影响的关系。



“提高高等教育质量”问题包括高等教育的定位、高等教育培养目标、专业培养方案设置、师资队伍建设、教学质量等问题，这些问题呈现明显的时间性、空间性和层次性特点，这些问题相互联系、相互制约。

教师的“师德修养”问题包括教师的道德认识、道德情感、道德意志、道德信念、道德行为和习惯等问题。教师只有在教育教学实践中，在处理师生之间、教师之间、教师与家长及教师与社会其他成员之间的关系中，才能认识自己的行为是与非，才能辨别善与恶，才能培养自己良好的教师道德品质。

现代化的工业产业结构调整涉及重工业与轻工业的关系，高新技术与传统技术的关系，工业内部如加工业与纺织业、制造业等关系，因此工业产业结构调整问题呈现出复杂性、风险性和模糊性等特征。

食品安全管理问题涉及原材料的采购、加工等生产安全质量管理，涉及运输、销售等环节安全质量管理，涉及法律、法规的约束和规范等，因此食品安全管理问题也是一个非常复杂的问题，任何一个环节的管理出现问题都会导致食品安全问题。

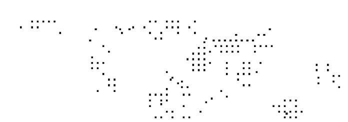
上述这些问题需要思考的环节越来越多，条件约束越来越多，相互关系越来越复杂，而且可供选择的条件越多其风险也随之加大。因此这些问题明显呈现如下三个特点。

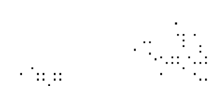
(1) 复杂性。涉及的问题多、范围广、尺度宽，关系错综复杂。例如现代化城市系统的和谐发展问题。城市系统由许多子系统构成，这些子系统包括人口系统、人文系统、经济系统、资源系统、市政系统、工业系统、商业系统、文化教育、医疗卫生、交通运输、邮电通信、城市建设系统等。这样规模庞大、范围广泛、变量繁杂的复杂大系统，要达到和谐发展，需要做好市政建设、环境建设、经济建设、文化建设等各方面的工作。在分析时，任何一个环节出错都会影响全局。

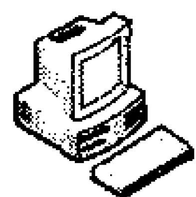
(2) 风险性。自然系统、社会系统和经济系统之间存在着千丝万缕的联系，具有许多不确定关系，如果处理不当将会产生不利影响，造成难以挽回的损失，甚至产生滞后多年的影响。例如上面提到的现代化城市系统的和谐发展具有明显的风险性特点。现代化城市系统与自然系统、社会系统、经济系统等之间存在着密切的联系，科学合理地处理好它们之间的关系，才能保障现代城市系统的和谐发展。

(3) 模糊性。系统性问题与系统的环境之间呈现“你中有我，我中有你”的局面，系统的边界呈现模糊性。例如现代化城市系统的和谐发展问题与社会系统、农业发展系统具有密切相连的关系，没有农业的大力支持很难有城市系统的和谐发展。例如教育系统发展问题，国家制定的许多教育政策关系到教育系统的生存发展，两者难以完全区分。这些问题的边界呈现模糊性特点。

随着社会的不断进步，产生的问题已经转化为日益复杂的问题(在这里暂且称之为系统性问题)。正是由于系统性问题的出现，使得问题的解决已经不再能够用某一学科的方法来解决，而是需要综合、交叉、多学科也即系统科学方法来解决。因此，系统性问题需要







运用系统科学的理论和方法寻找解决问题的最佳方案。

注意：本章中所说的都是一些综合性问题，且这些问题满足复杂性、风险性、模糊性的特点。这里暂且称之为"系统性问题"。等我们学习了系统的概念之后，将"问题"与"系统"结合起来，对"系统性问题"的概念才会有更深刻的理解。关于"系统"的概念将在第2章中予以介绍。

1.1.3 系统科学研究的内容

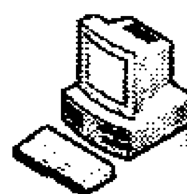
系统科学涵盖了系统哲学、系统基础科学、系统方法科学以及系统应用科学等内容。系统哲学创造性地运用哲学提供的世界观、方法论和认识论研究事物之间的普遍联系，揭示系统内部各元素之间、系统各层次之间、系统与环境之间及系统发展过程各个阶段之间关系的本质。系统基础科学研究系统的功能、结构、系统与环境的关系，尤其是如何从无序状态形成系统的有序结构，即系统的自组织理论等，主要涉及系统论、系统的自组织理论。系统方法科学是以系统科学基本理论为依据，针对各专业系统工程中存在的共性技术问题统一处理而形成的系统方法论。例如系统科学领域中资深的"老三论"——系统论(system)、控制论(cybernetics)和信息论(information)，又称为SCI论，及20世纪70年代以来陆续确立并迅速发展的三门系统理论的分支学科——耗散结构论(dissipative)、协同论(synergetic)、突变论(catastrophe)，合称"新三论"，也称为DSC论。系统应用科学是将系统科学的理论和方法应用于人们的实践活动中，也被称做系统工程。包括系统分析、系统设计与系统管理。

今天已经有越来越多的人认识到"老三论"和"新三论"影响并改变着21世纪的科学图景和人类对世界的认识，它们也都是系统工程重要的理论基础，在此对其理论作简要的概述。

1. 系统论、控制论和信息论——"老三论"理论概述

系统论的创始人是美籍奥地利理论生物学家L. V. 贝塔朗菲(L. Von. Bertalanffy)。系统论要求把事物当做一个整体或系统来研究，并用数学模型去描述和确定系统的结构和行为。所谓系统，是由相互作用、相互依赖和相互制约的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体；而系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。贝塔朗菲旗帜鲜明地提出了系统观点、动态观点和层次观点，指出复杂事物功能远大于某组成因果链中各环节的简单总和，认为一切生命都处于积极运动状态，有机体作为一个系统能够保持动态稳定是系统向环境充分开放，获得物质、信息、能量交换的结果。系统论强调整体与局部、局部与局部、系统本身与外部环境之间相互依存、相互影响和制约的关系，具有目的性、动态性、有序性三大基本特征。

控制论是著名的美国数学家维纳(N. Wiener)同他的合作者自觉地适应近代科学技



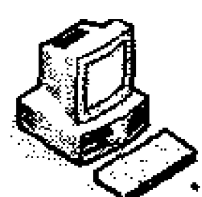
术中不同门类相互渗透与相互融合的发展趋势而创始的。它摆脱了牛顿经典力学和拉普拉斯机械决定论的束缚,使用新的统计理论研究系统运动状态、行为方式和变化趋势的各种可能性。控制论是研究系统的状态、功能、行为方式及变动趋势,控制系统的稳定,揭示不同系统的共同控制规律,使系统按预定目标运行的技术科学。

信息论是由美国数学家香农(C. E. Shannon)创立的。信息论分为狭义信息论与广义信息论。狭义信息论是关于通信技术的理论,它是以数学方法研究通信技术中关于信息的传输和变换规律的一门科学。广义信息论,则超出了通信技术的范围来研究信息问题,它以各种系统、各门科学中的信息为对象,广泛地研究信息的本质和特点,以及信息的获取、加工、处理、传输、储存、控制和利用的一般规律。显然,广义信息论包括了狭义信息论的内容,其研究范围却比通信领域广泛得多,是狭义信息论在各个领域的应用和推广,因此,它的规律也更一般化,适用于各个领域,所以它是一门横断学科。狭义信息论是研究在通信系统中普遍存在着的信息传递的共同规律,以及如何提高各信息传输系统的有效性和可靠性的一门通信理论。广义信息论被理解为运用狭义信息论的观点来研究一切问题的理论。信息论认为,系统正是通过获取、传递、加工与处理信息而实现其有目的的运动的。信息论能够揭示人类认识活动产生飞跃的实质,有助于探索与研究人们的思维规律和推动与进化人们的思维活动。

2. 耗散结构论、协同论和突变论——“新三论”理论概述

耗散结构理论是比利时物理学家普利高津(I. Prigogine)于 1969 年提出来的。一般说来,开放系统有三种可能的存在方式:热力学平衡态、近平衡态、远离平衡态。耗散结构论者认为,系统只有在远离平衡的条件下,才有可能向着有秩序、有组织、多功能的方向进化,这就是普利高津提出的“非平衡是有序之源”的著名论断。在长期的研究工作中,普利高津发现,当一个远离平衡态的开放系统,由于许多复杂因素的影响而出现非对称的涨落现象,当达到非线性区时,在不断与外界进行物质和能量交换的条件下,系统将可能发生突变,由原来的无序混沌状态自发地转变为一种在时空或功能上的有序结构。事物的这种在非平衡状态下新的稳定有序结构就称为耗散结构。而耗散结构论则是探索耗散结构微观机制的关于非平衡系统行为的理论。系统论所要寻求的也就是这种具有有序性的稳定结构,从这个意义上说,耗散结构论与系统有异曲同工之妙。

协同论又称为协同学理论,是 20 世纪 70 年代联邦德国著名理论物理学家哈肯(H. Haken)在 1973 年创立的。他认为自然界是由许多系统组织起来的统一体,这许多系统就称为小系统,这个统一体就是大系统。在某个大系统中的许多小系统既相互作用,又相互制约,它们的平衡结构,而且由旧的结构转变为新的结构,则有一定的规律,研究本规律的科学就是协同论。协同学理论也是处理复杂系统的一种策略。其目的是建立一种用统一的观点去处理复杂系统的概念和方法。协同论的重要贡献在于通过大量的类比和严谨的分析,论证了各种自然系统和社会系统从无序到有序的演化,都是组成系统的各元素之



间相互影响又协调一致的结果。

突变理论是法国数学家托姆(R. Thom)在1972年创立的。突变论研究的是客观系统的非连续性突然变化现象。具体来说,就是用数学方程描述某一特定事物从一种稳定组态突变到另一种稳定组态的现象和规律。突变理论通过探讨客观世界中不同层次上各类系统普遍存在着的突变式质变过程,揭示出系统突变式质变的一般方式,说明了突变在系统自组织演化过程中的普遍意义;它突破了牛顿单质点的简单性思维,揭示出物质世界客观的复杂性。在现实中,突变论可以用数学模型来预测事物的连续性中断并发生质变的过程。在系统理论的发展中,突变论有着重要意义。有人把突变论的提出,称为"是牛顿和莱布尼茨发明微积分三百年以来数学上最大的革命"。从哲学角度看,突变论有效破解了事物质变是渐变还是飞跃的争论。

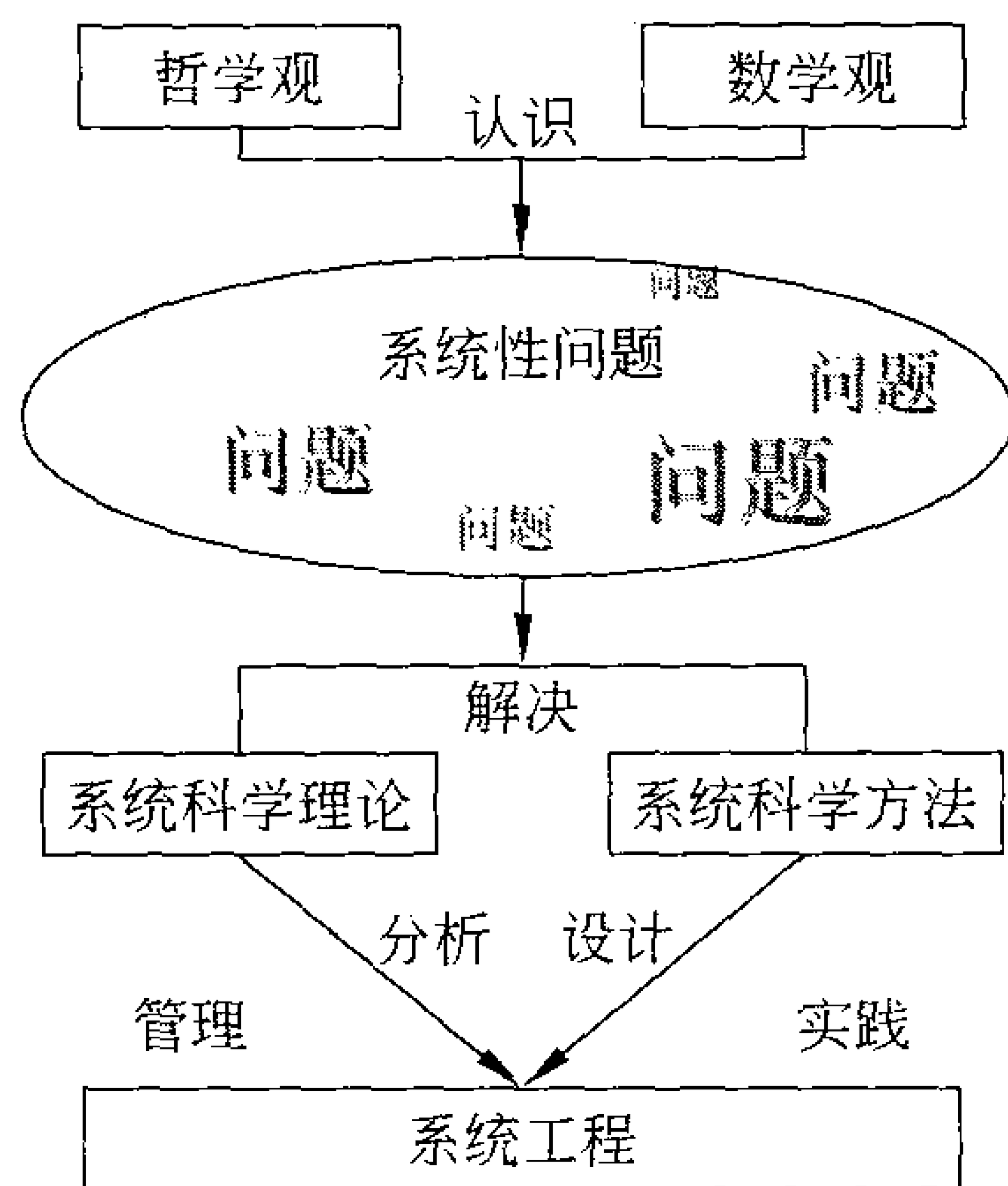


图 1-1　系统科学研究的内容关系

综上所述,可以用图1-1来描述系统科学研究的内容。

系统科学是用哲学的观点、用数学的思想去认识、分析系统性问题,研究系统的功能、结构关系等,并进行分析、设计、管理和实践应用。

总之,可以运用系统科学的理论和方法寻找解决系统性问题的最优方案。

1.2　系统工程概述

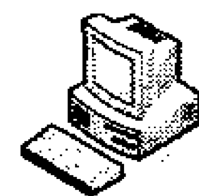
系统应用科学是系统科学涵盖的第四个层次的研究内容,是将系统科学的理论和方法应用于人们的实践活动中,被称做系统工程。

系统工程是一门正处于发展阶段的新兴学科,是以一般系统为研究对象的一门工程技术。用系统的思想以及定性、定量的系统方法,包括计算机、人工智能等技术处理大型、复杂的系统性问题。无论是系统的设计或建立,还是系统的经营管理,都可以统一地看成一类系统实践,统称为系统工程。系统工程的应用已经渗透到社会生活、经济建设中的每一个领域。同时,系统工程在实际应用中,也和其他学科知识融会贯通、交叉结合。

系统工程的核心是用系统科学思想、系统科学方法来认识、分析、处理和解决系统性问题。

1.2.1　系统工程的定义

关于系统工程,不同领域的人有着不同的理解。下面列举国内外工程界人士对系统



工程的一些定义，可以为全面理解系统工程提供一些参考。

（1）我国科学家钱学森（1978）院士认为：系统工程是组织管理系统的规划、研究、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。简言之，系统工程是一门组织管理的技术。

（2）日本工业标准（JIS）定义："系统工程是为了更好地达到系统目标而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术。"

（3）美国质量管理学会系统工程委员会定义："系统工程是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学。"

（4）苏联大百科全书对系统工程的定义是："系统工程是一门研究复杂系统的设计、建立、试验和运行的科学技术。"

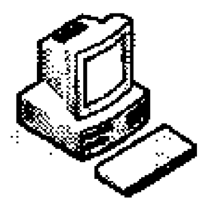
综上所述，系统工程的定义可以总结为：系统工程一般是针对大型、复杂的人工系统和复合系统，考察在一定的目标函数和外界环境约束下，组织协调好系统内各要素的活动，使各要素为实现系统整体目标发挥适当的作用，采用定性和定量相结合的方法，运用现代技术，如计算机及其多种系统软件和应用软件，最终使系统整体目标达到最优的技术和管理相结合的过程。

最后我们引用"系统科学与工程研究"资料对系统工程的解释：系统工程主要研究人类社会的复杂或大规模生产、科学技术和社会经济等活动，即以大系统为对象，用系统与控制的思想、观点与方法，并借助于计算机为工具来分析、揭示和预演各种复杂事物的发展演变过程，从而设计出一个或多个能够多、快、好、省地达到预期目标的系统化过程（包括人为加入的措施和过程），然后精心组织这种过程的实施和实现，使得人们在各种大规模活动中避免盲目性和失误，以获得巨大的经济效益和社会效果。

注意：（1）如果把之前的工程称做传统工程，则系统工程与传统工程有着本质的区别。"传统工程"往往以硬件为对象，侧重于制造有形产品；而"系统工程"则侧重于设计传统工程，对传统工程进行优化、组合等的计划、方案等，往往是以软件为对象，侧重于制造无形产品。

例如，以工业系统工程为例，既可以把整个工业系统作为研究对象，也可以把从属于工业系统某一层次的子系统（如制造业、电子业）作为研究对象。系统工程则在这些纵向分类的各领域中规划与综合设计新系统，并对已有系统提供最佳利用的方法论。

（2）纵向分类的工程领域忽视领域间的横向关系，一味朝专业化、细分化的方向发展，其结果使得以产业化为中心的各种活动失去了总体的协调，这无疑导致了资源能源的浪费、环境问题及其他社会问题。



1.2.2 系统工程发展简史

系统工程的发展大致可以分为萌芽、发展、成熟三个时期。

1. 萌芽时期

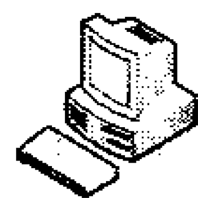
系统工程的思想在古代就出现了，而且不乏成功使用系统思想的案例。20 世纪初，美国的泰勒从合理安排工序、分析人工的操作、提高劳动生产率入手，研究管理科学，探索科学管理的基本规律，到 20 年代逐步发展为工业工程，主要研究生产在时间和空间上的管理技术。30 年代，美国贝尔电话公司提出系统途径的观点，1940 年正式采用"系统工程"这个词，并且在研究发展微波通信网时，应用一套系统工程的方法论，取得了良好的效果。第二次世界大战期间，由于军事上的需要，人们提出并发展了运筹学，运筹学在以后的应用中逐渐发展成为系统工程的理论基础。战后，这种理论被迅速推广到经济和管理领域。1945 年，兰德公司在美国建立，开始研究复杂系统的数学分析方法。以后，美国采用系统工程分析方法对国防系统、宇航系统以及电力、交通、通信等大规模的系统进行研究开发，取得了很多成果。40 年代后期，工程界出现了控制论、信息论。1946 年，第一台电子计算机在美国研制成功。这些都为系统工程的发展奠定了坚实的基础。

2. 发展时期

1957 年，美国密执安大学的 H. H. Goode 和 R. E. Machol 合著出版了第一本《系统工程》。从此，系统工程作为专门术语沿用至今。这时，许多运筹学的成果已经开始大量应用到民用系统中，成为经营管理的手段。与此同时，运筹学自身也得到了极大的发展。美国在研制原子弹的"曼哈顿"计划中，运用系统工程方法取得显著成效，为推动系统工程的发展起到了一定的作用。1958 年美国在北极星导弹核潜艇的研制中，首次采用了计划评审技术(PERT)，获得了成功，有效推进了计划管理。现在，PERT 方法已经在大多数先进企业内采用。PERT 方法以及由它派生的方法已成为系统工程的重要方法之一。20 世纪 60 年代开始，计算机在西方普遍使用，为系统工程的发展和应用提供了强有力的工具。1965 年，美国学者 R. E. Machol 编写了第一本《系统工程手册》，比较完整地阐述了系统工程理论、系统方法、系统技术、系统数学、系统环境等内容。至此，系统工程初步形成完整的理论体系。1969 年，"阿波罗"登月计划的实现是美国继曼哈顿计划、北极星计划之后，在大型项目研制上运用系统工程取得成功的又一实例。在此期间，日本将系统工程理论运用于质量管理等方面，也取得显著效果，以后得以推广。1972 年成立国际应用系统分析研究所。

3. 成熟时期

我国从 20 世纪 60 年代开始，以钱学森为代表的科学家运用系统工程发展尖端技术。1980 年成立系统工程研究所和中国系统工程学会。1989 年，钱学森在系统方法论方面创



造性地提出针对开放复杂巨系统的从"定性到定量的综合集成方法"，作为一项技术又称综合集成技术，作为一门工程，也可以称为综合集成工程。1992 年，钱学森提出了从理论到实践、从定性到定量综合集成的研讨厅体系。1996 年，在全国系统方法论及其应用研讨会上汪浩教授提出了研讨厅的一个组织结构模型。顾基发教授在系统工程实践的总结经验基础上，以及综观国际各类系统工程方法论以后，于 1994 年提出物理－事理－人理(WSR)系统方法论。WSR 系统方法论哲理和理念的基本核心是在处理复杂问题时既要考虑对象的物的方面(物理)，又要考虑这些物如何更好地被运用在事的方面(事理)，最后由于认识问题、处理问题、实施管理与决策都离不开人的方面(人理)，把物理－事理－人理作为一个系统，达到懂物理、明事理、通人理。

系统工程在我国发展迅速。"神舟"五号、六号、七号宇宙飞船的成功发射，嫦娥一号成功进入预定轨道并且有效运作等，都是作为航天系统工程项目来开发的。非典型性肺炎防治工作是一项复杂的社会系统工程。2007 年国家启动的大飞机工程；2008 年北京奥运会等举世瞩目的大事，这些都是作为系统工程项目进行筹划和运作的。

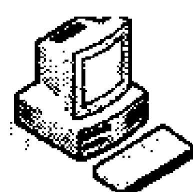
1.2.3　系统工程的实践应用

在中国古代历史上，就出现了很多运用系统工程产生的杰作。例如，战国时期，李冰父子为治水主持的"都江堰水利工程"。"都江堰水利工程"分别由三大主体工程(即"鱼嘴"分洪工程、"飞沙堰"分洪排沙工程和"宝瓶口"引水工程)、120 个附属渠堰工程及总工程完工之后建立的一套养护制度组成的兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多种功能的一个有机整体。该有机整体充分体现了整体观念、优化方法，开放的、发展的系统思路，是系统工程中统筹安排、优选方案的杰作。又如宋朝皇宫的"宫前大街修造工程"。采取挖沟取土烧砖、引水灌沟成河、水路运输建材、完宫添砖复街的一套运筹方法体系，又是一个系统工程佳作。直到今天，它们仍然是系统工程的代表作，散发着系统工程科学实践的异彩。

我国在 20 世纪 50 年代，以运筹学开始系统工程的基础理论研究。70 年代末系统工程逐步兴起并得到长足发展，出现了许多现代系统工程应用案例。例如，胡锦涛等中央领导人把"神舟"五号成功发射、抗击 SARS 取得的胜利等重大事件都称为系统工程。中央的许多重大举措如西部开发、振兴东北老工业基地、科学发展观、提高党的执政能力、构建和谐社会、建设有中国特色的社会主义等都是系统工程的实践应用。

构建"和谐社会"是一项系统工程。和谐社会是民主法治、公平正义、诚信友爱、充满活力、安定有序、人与自然和谐相处的社会，实现人口、资源、环境统筹协调发展。因此，构建社会主义和谐社会，既要体现广大人民群众的"最近目的和利益"，也要体现广大人民群众的"未来"利益，是一项复杂的系统工程。

新郊区创建是一项系统工程。新郊区创建包括规划布局合理、经济实力增强、人居环境良好、人文素质提高、民主法制增强等一系列创建活动。既要加快发展生产力，又要调



整完善生产关系；既要加强物质文明建设，又要加强政治文明、精神文明与和谐社会建设；既要广泛调动基层和农民群众积极性，又要尊重自然规律、经济规律和社会发展规律，切实提高建设社会主义新农村的能力和水平（目标）。

大学生职业生涯规划与实施是一项系统工程。职业生涯规划也叫职业生涯设计，是指个人和组织的结合，在对一个人职业生涯的主客观条件进行测定、分析、总结研究的基础上，对自己的兴趣、爱好、能力、特长、经历及不足等各方面进行综合分析与权衡。结合时代特点，根据自己的职业倾向，确定其最佳的职业奋斗目标。并为实现这一目标作出行之有效的安排。比如，作出个人职业的近期和远景规划、职业定位、阶段目标、路径设计、评估与行动方案等一系列计划与行动。

目前，系统工程已经在各个领域得到了广泛的运用。大至国家系统、社会系统、产业系统、各种工业系统、各种服务系统等，小至企业的产品开发、经营计划、生产管理、库存管理等。可以说，它能应用于解决一切部门复杂而又困难的项目的规划设计问题、管理控制问题以及生产运行问题。

1.2.4　系统工程的发展趋势

从系统工程的实践应用来看，公共管理系统工程及信息系统工程及其交叉应用将成为系统工程实践应用的主体发展方向。

在公共管理系统工程领域内，交通运输系统工程是一个重要的研究方向。它提出许多令人振奋的研究，这些研究既有最尖端的理论研究，又有能被专业人员立即应用到实践中去的应用技术研究。具体研究项目包括交通系统的设计、运作和协同优化，交通系统的安全与风险预警，交通系统的评价、优化与仿真等。

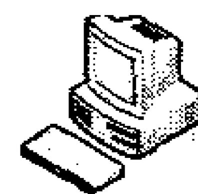
在信息系统工程领域内，通信网络系统工程是其中一个重要的分支。为了适应在同一网络中声音、数字、图像等多媒体综合服务，要求改进通信系统，采用先进的数字集成电路和微处理器。具体研究内容包括传送流、路线、规程、集成交换、拓扑设计、信息拥挤控制、自适应结构、动力学模型。目前，这方面主要的研究兴趣在多媒体集成工作站、新颖的交换和多路通信，用于大范围多用户在不规则环境下的电子通信服务等。

与此同时，国内系统工程研究也开始面向大系统、多学科问题的交叉技术的开发，系统集成的工程开发；尤其是与计算机、人工智能相关联的硬件、软件及其他专业技术相结合的系统与技术开发。

1.2.5　系统工程的特点

一项系统工程应具有整体性、关联性、综合性、满意性等基本特点。

（1）整体性也称为系统性。系统工程把研究对象作为一个由若干部分有机结合成的整体系统，研究其整体与部分之间相互作用和依赖关系，进而揭示系统的特征和规律，从



整体优化去实现各部分的有效运转。

例如，都江堰水利系统工程就是由三大主体工程、120 个附属渠堰工程和一套养护制度组成的兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多种功能的一个有机整体。

(2) 关联性也称为协调性。用系统工程的方法去分析和处理问题时，不仅要考虑系统的各个部分之间、各部分与整体之间的相互关系和作用，还要注意它们之间关系的协调性。部分与部分之间、部分与整体之间的协调作用将直接影响整个系统的性能。

例如，都江堰水利系统工程的三大主体工程："鱼嘴"分洪工程、"飞沙堰"分洪排沙工程和"宝瓶口"引水工程，它们各自具有自己的独特作用，同时又具有相互联系和相互制约的不可分割的关系；和谐社会要实现人口、资源、环境等统筹协调发展，既要发挥人口、资源、环境等各部分在和谐社会中的作用和功能，更要注意它们之间协调一致的作用对和谐社会的影响。

(3) 综合性也称为交叉性。系统工程以大型复杂的人工系统和复合系统为研究对象，这些系统涉及的因素很多、学科领域广泛。因此，系统工程必须综合研究各种因素，综合运用各门学科和技术领域的成就，从整体目标出发使各门学科、各种技术有机地配合，以达到整体目标最优的目的。例如"神舟五号计划"就是综合运用各学科、各领域成就的产物。

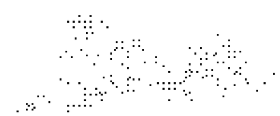
(4) 满意性也称为最优化。系统工程是实现系统整体最优的组织管理技术。因此，系统整体性能的最优化是系统工程所追求并要达到的目的。由于整体性是系统工程最基本的特点，所以系统工程追求的是系统整体性能的满意解，而不是其中各自部分的最优。

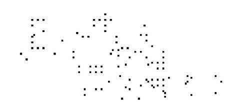
系统工程除了具有这些基本的特点以外，很多复杂的系统工程同时还具有动态性、非线性等特点。

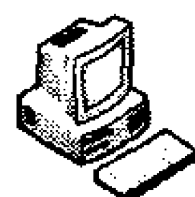
1.3 结语

系统工程在中国的发展可谓"得天独厚"。几十年来，系统工程在中国的发展得到了两方面持续不断的大力推进。一方面是以钱学森院士为代表的学术界，另一方面是从中央到地方的各级领导人。胡锦涛总书记在 2004 年 6 月 2 日中国科学院暨中国工程院院士大会上说："落实科学发展观，是一项系统工程，不仅涉及经济社会发展的方方面面，而且涉及经济活动、社会活动和自然界的复杂关系，涉及人与经济社会环境、自然环境的相互作用。这就需要我们采用系统科学的方法来分析、解决问题，从多因素、多层次、多方面入手研究经济社会发展和社会形态、自然形态的大系统。"

系统工程推动改革开放，改革开放需要系统工程。两者与时俱进，相辅相成。系统工程在中国已经得到了长足的发展，取得了伟大的成功。自觉运用系统工程的思想和方法论，积极开展系统工程项目研究，可以促使系统工程早日实现辉煌。我们引用系统工程专







家孙东川教授对系统工程发展的理解，他认为，系统工程已经发展为一种普遍使用的方法论，即用系统的观点来考虑问题（尤其是复杂系统和复杂大系统的问题），用工程的方法来研究和求解问题（定性与定量相结合，从定性到定量的综合集成）。不妨称之为“方法论系统工程”，即“作为方法论运用的系统工程”。

总之，系统工程是按照系统科学的原理和方法来设计或改造一个系统，使其具有预期的功能。

本章小结

系统科学是多维的、交叉的（横跨自然科学、社会科学和工程技术）、综合的，作为现代科学技术体系中的一个大部门的新兴学科。将传统科学与系统科学放在一个二维坐标系中，则传统科学是以知识的“事物”主题为坐标，系统科学则是在坐标平面中以知识的“关系”作为主题，研究事物与事物的“关系”作用。

系统应用科学是系统科学涵盖的第四个层次的研究内容，是将系统科学的理论和方法应用于人们的实践活动中，被称做系统工程。系统工程是一门正处于发展阶段的新兴学科，是以一般系统为研究对象的一门工程技术。用系统的思想以及定性、定量的系统方法，包括计算机、人工智能等技术处理大型、复杂的系统性问题。无论是系统的设计或建立，还是系统的经营管理，都可以统一地看成一类系统实践，统称为系统工程。系统工程的应用已经渗透到社会生活、经济建设中的每一个领域。同时，系统工程在实际应用中，也是和其他学科知识融会贯通、交叉结合。系统工程的核心是用系统科学思想、系统科学方法来认识、分析、处理和解决系统性问题。

思考题

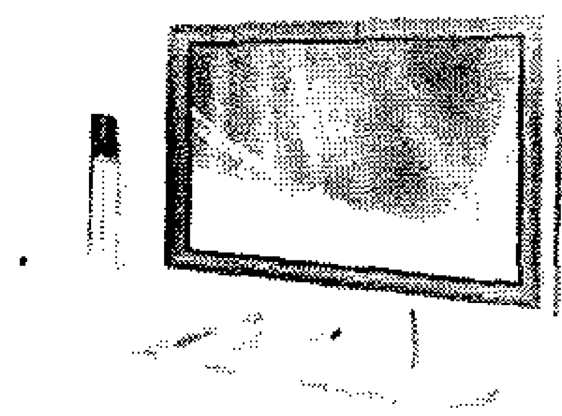
1. 谈谈系统科学与系统工程的关系。

2. 给出1～2个系统性问题，说明这些系统性问题具有的复杂性、风险性和模糊性特点。

3. 从参考资料中摘录1～2个系统工程实例表明系统工程在社会经济发展或和谐社会中所起的重要作用。

4. 查资料了解我国系统工程理论与应用研究的奠基人和倡导者钱学森院士是如何阐明社会系统工程的。

5. 你认为“和谐校园建设”是一项系统工程吗？给出你的理解。



第2章 系统工程研究的对象——系统

本章关键词

系统(system)　系统的结构描述(system structural description)

本章要点

系统的概念,诸如系统的定义,系统的功能、特性和分类。

两种描述系统的方法——几何法和集合法,尤其是它们所具有的描述特点。

通过解释结构模型方法(系统的集合描述法)掌握系统的结构描述步骤,进而用解释结构模型方法描述社会、经济、教育等系统的结构,为学习系统工程奠定基础。

2.1 系统的基本概念

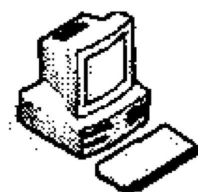
伴随着信息社会和综合技术的迅速发展,人们的生活、工作和社会的发展特征都表现出系统性特点,系统科学变得越来越重要。系统是系统工程研究的对象,因此系统的概念是系统工程的核心和基本概念,明晰系统的概念是奠定学习系统工程的重要基础。

系统在我们的日常生活中无处不在。在自然界和人类社会中,可以说任何事物都是以系统的形式存在的,大到宇宙、银河系、太阳系、地球等天体系统,小到高能物理学研究的原子核结构;远到如战国都江堰水利工程系统,近到越来越主宰人们生活、工作的计算机系统等,这些所要研究的对象都可以被看成一个又一个系统。

2.1.1 系统的定义

目前,国内外学者对系统的定义还没有统一的说法,下面列举其中几个具有代表性的定义。

(1) 系统论创始人 L. V. 贝塔朗菲对系统给出了四种阐述:系统是由定量测度 Q_1,Q_2,…,Q_n 标志的相互作用的一系列要素 P_1,P_2,…,P_m;系统是相互作用的诸要素的复合体;系统是处于相互关系中的诸要素的一个集合;系统是处于相互关系中并与环境有相互关系的诸要素的集合。



(2)《韦氏大词典》中对系统的解释为：有组织的或被组织化的整体；结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合；由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合等。

(3)日本工业标准(JIS)对系统的定义为：许多组成要素保持有机的秩序，向同一目标行动的体系。

(4)美国著名学者阿柯夫(R. L. Ackoff)解释为：系统是由两个或两个以上的相互联系的任何种类的要素所构成的集合，因此，系统不是一个不可分解的要素，而是一个可以分成许多部分的整体。

(5)苏联学者乌耶莫夫从系统功能的角度认为：系统是客体具有的"某种满足预先确定的性质的关系"。

(6)我国著名科学家、系统工程倡导者钱学森认为：系统是由相互作用和相互联系的若干组成部分结合而成的具有特定功能的整体，而且这个"系统"本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。

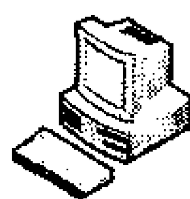
上述这些对系统的定义大同小异，其实本质都是相同的。我们从中可以总结给出系统的定义：由两个或两个以上相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的若干组成部分以某种分布形式结合成的，具有特定功能、朝着特定目标运动发展的有机整体。这个有机整体称为系统。而若干组成部分又称为元素、部分、局部，在一定意义上又称为子系统。

例如，一辆汽车、一所学校、一个家庭是系统；一篇文章、一本书、一首歌、一张药方等也都是系统；由神经系统、循环系统、消化系统等七大子系统组成的人体系统；由计算机硬件系统、软件系统组成的计算机系统；天体系统、河川山谷自然系统等，这些系统可以互相包含，也可以互相交叉和融合。我们每一个人都生活在系统之中，或者说是生活在多种多样、相互交叉的系统之中。

根据系统的定义，系统的构成必须满足"整体性"、"关联性"、"功能性"、"动态性"和"目标性"五性要点。

(1)系统是由两个或两个以上的元素组成的"整体"。例如，社会保险系统是由"养老保险"、"医疗保险"、"失业保险"、"工伤与生育保险"这些子系统元素组成的一个"整体"。养老保险系统由"人均社会平均工资"、"缴费人数"、"单位缴费比例"、"个人缴费比例"、"领取人数"、"利率"、"工资增长率"、"新增加工作人数"等元素组成。最简单的人口系统由人口总数、出生率和死亡率这些要素构成。

(2)系统中各元素之间相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用。例如，构成社会保险系统的"养老保险"、"医疗保险"、"失业保险"、"工伤与生育保险"这些子系统元素相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用。高失业率不仅增加失业保险的压力，同时也降低了养老保险基金的收入，继而加大了养老保险支付的压力；高失业率也会导致疾病上升、心理不健康，所以高失业率也会加剧医疗保险的支付，带来社会问题。



又例如，在生物—心理—社会模式中，生物因素、心理因素和社会—文化因素各有各的独特内容，同时又具有相互联系、相互包含和相互制约的不可分割的关系。生物学因素是最基本的因素，是整个模式图的核心部分，是心理学因素赖以产生的物质基础，也是心理和社会文化因素所作用的物质承受者。心理学因素是在生物学因素上产生出来的，而它一旦产生就时时刻刻给予生物学因素以深刻的影响和制约。社会—文化因素则是在生物学和心理学因素共同基础上产生的，它反过来又直接影响制约着心理学因素，是心理学因素赖以形成和出现的根源所在；对生物学因素的影响和制约是间接的，一般来说，通过心理学因素的折射作用才能实现。这个模式还告诉我们，在人的心理与行为活动的发生、发展和变化的过程中，所有这些因素是错综复杂地交织在一起而起作用的。

(3) 组成系统的各个元素协同运作，使系统作为整体具有各组成元素单独存在时所没有的某种特定功能。例如，图 2-1 给出了由运算器、存储器、控制器和输入/输出设备组成的计算机硬件系统。

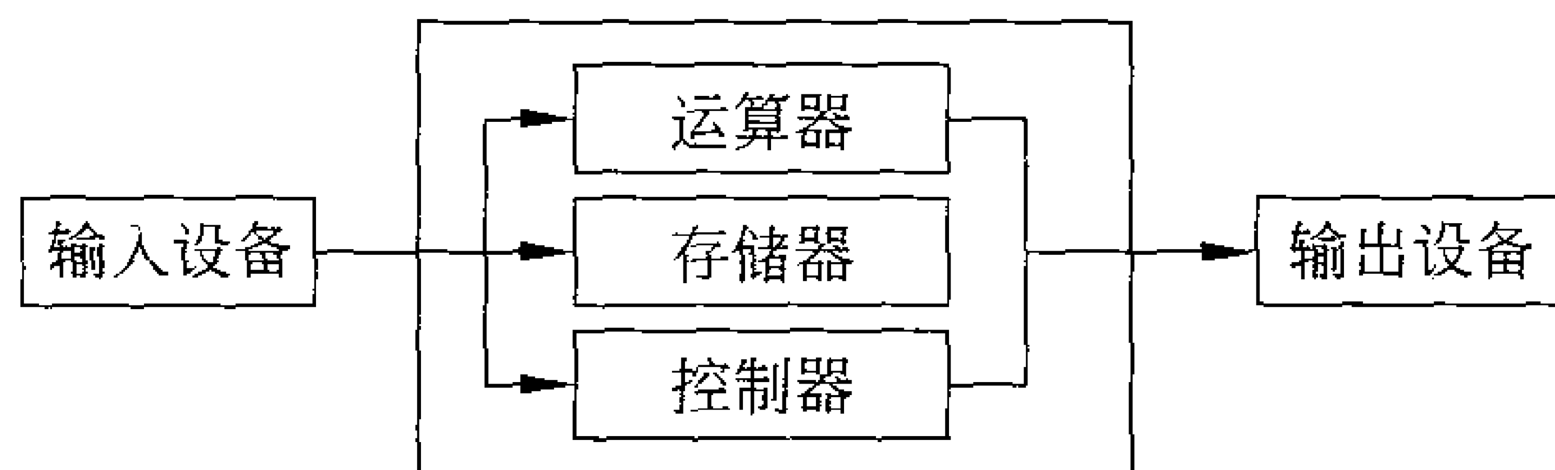


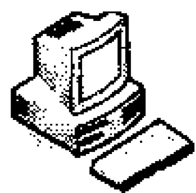
图 2-1　计算机硬件系统

这五个组成部分各自具有不同的功能：运算器是直接完成各种算术运算和逻辑运算的装置；存储器为存放数据和程序的装置；输入设备是向计算机送入数据、程序及各种字符信息的设备；输出设备则将计算机工作的中间结果或最后结果表示出来(显示或打印)；控制器是整个计算机的指挥系统。但是这些都不是作为一个有机整体的计算机系统的功能，它的功能是依靠上述五个组成部分结合以后产生的“记忆”能力、逻辑判断能力和选择能力，可以用于数值计算、数值处理、自动控制、辅助设计、逻辑关系加工和人工智能等方面的工作，因此组成计算机硬件系统。

(4) 系统是运动和发展变化的，是动态的发展过程。例如，社会保险系统。现有的社会保险政策并不是一成不变的，随着社会经济的发展、人口等环境因素的改变，社会保险政策会随着这些因素的改变而调整。就老百姓关心的养老保险、医疗政策而言，中国目前的养老、医疗政策没有做到“人人养老”、“人人医保”，但是一旦社会、经济等条件允许，“人人养老”、“人人医保”将是社会保险系统的一个发展趋势。

又如人们非常熟悉的计算机系统。就操作系统而言，从最初的命令式 DOS 系统，慢慢发展到窗口式 Windows 系统及其他操作系统，它的应用也是在不断地扩大与发展的。而计算机软件的发展和更新则更不必说，你每天打开计算机都会见到“更新”提示。

相比而言，一副静静地摆放在盒子里的象棋则不能称其为系统。



(5) 系统的运动具有明确的目标。例如,城市系统的总体目标是做好市政建设、环境建设、经济建设、文化建设等各方面。那么子系统的目标也肯定是围绕这个总体目标,各自执行自己的职能为总目标服务。

注意:系统的"整体"与构成系统的"部分"是相对的,整体中的某些部分可以被看成该系统的子系统,而整个系统又可以成为一个更大规模系统中的一个组成部分,即子系统。例如,我们生存的城市系统,是由资源系统、市政系统、工业系统、商业系统、文化教育、医疗卫生、交通运输、邮电通信等子系统组成的。而每一个城市系统又属于更大范围的系统,如从属于一个国家系统。

德国古典哲学大师黑格尔从辩证的高度对系统整体与其部分的关系进行了深刻论述:不应当把动物的四肢和各种器官只看做动物的各个部分,因为四肢和各种器官只有在它们的统一体中才是四肢和各种器官。四肢和各种器官只是在解剖学家的手下才变成单纯的部分,但这个解剖学家这时处理的已不是活的躯体,而是尸体。恩格斯高度评价黑格尔的系统思想:一个伟大的基本思想,即认为世界不是一成不变的事物的结合体,而是过程的结合体。

总之,系统这个概念其含义十分丰富。与要素相对应,意味着总体和局部;与孤立相对应,意味着关系与联系;与混乱相对应,意味着秩序与规律。研究系统,意味着从事物的总体与全局上、从要素的联系与结合上去研究事物的运动与发展,找出其固有的规律,建立正常的秩序,实现整个系统的优化。这正是系统工程的宗旨。

2.1.2 系统的输入、输出和系统的功能

系统的输入和输出可以体现系统与环境的关系,也是划分系统边界的重要依据。

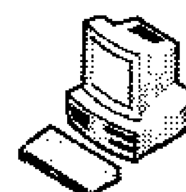
输入是指外界环境供给系统的物质、能量和信息。例如供给生产系统的原材料、燃料、动力、技术、信息、管理等为生产系统的输入。

输出是指系统向外界输出的物质、能量和信息,是由系统对输入经过处理和加工转换过程的产品或服务。例如生产系统的输出可以是产品、成果、服务、信息等。

系统的功能则是将输入转换为人们所需要的输出,这种处理(转换和加工)的能力就是系统的功能。因此,系统的功能又可以解释为一种处理或转换机制,这种转换机制将输入转换为人们所需要的输出。所以,从狭义上说,处理和转换就是系统的功能。从广义上说,可以把输入和输出也作为系统的功能。

总体来说,系统的输入、输出及其功能可以用图 2-2 表示。

例如,计算机处理数据的能力,即处理数据的速度、处理数据的精度和存储数据的容量,这些都是计算机系统的基本功能。"企业"的基本功能是将各种原材料经过转换,生成市场上需要的产品。可以将"人体系统"(图 2-3)的功能描述为,输入器官:人体消化系统



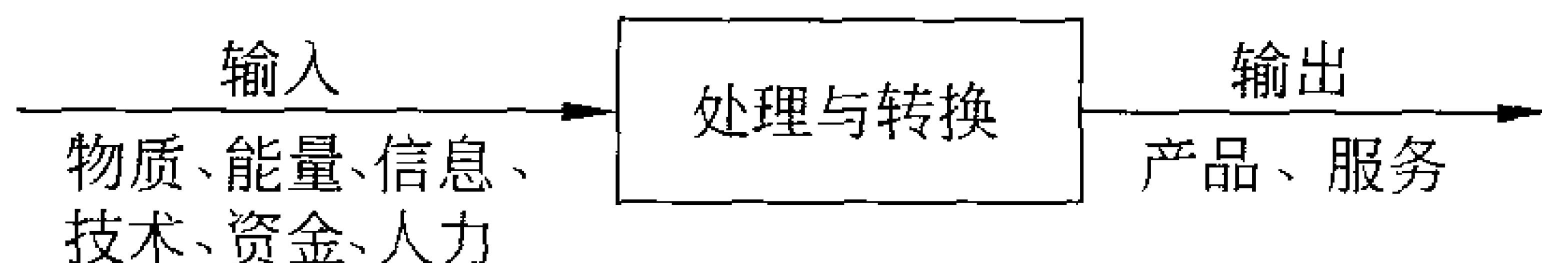


图 2-2　系统功能示意图

中的口腔和食道；处理器官：胃、肠、肝、胆等是消化物的转换器；储存器官：肌肉、脂肪等是保存人体养分和能量的储存器；控制器官：脑和神经系统则是指挥各种器官如何运作的（包括信息传递功能）；输出器官：人体的输出则是人的能量输出和排泄物。

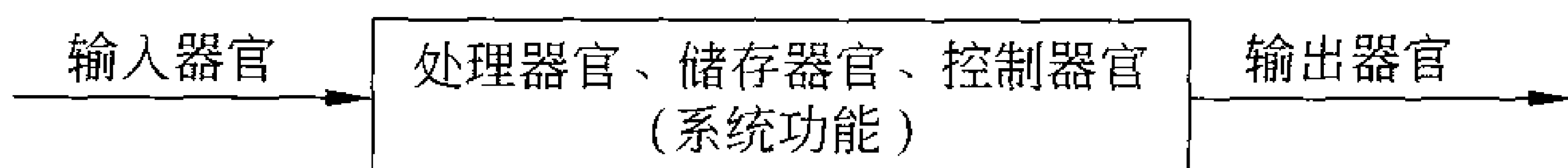


图 2-3　人体系统功能示意图

注意：如果考察的系统是反馈系统，往往还将反馈作为系统的功能。反馈是指输出对输入的影响。例如，政策执行的效果反馈就可以作为系统的反馈信息。

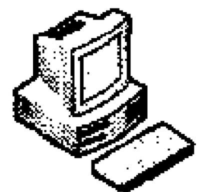
2.1.3　系统的环境

系统的环境是指一个系统以外的又与系统有关联的所有其他部分。系统环境可以分为一般系统环境和系统相关环境。前者是指一般系统共存的环境，而后者则是指系统特有的密切相关的环境因素。

根据社会学研究，一般环境可以分为文化、技术、教育、政治、法律、自然资源、人口、社会学和经济等因素。系统环境也可以分为社会环境、经济环境、科技环境、自然环境等方面。一般可以归纳为三大类，即物理、技术环境，经济、管理环境，社会、人际环境。系统的这种环境分类如图 2-4 所示。

例如，构建全方位的创新型人才培养环境。内在因素与外在的因素共同影响着人才的培养与成长。先进的教育设备、充足的教学场地、便利的住宿条件、丰富的图书馆藏等为大学生的创新活动提供了优越的物质保障，而优良的高校精神能使大学生产生巨大的学习热情和创造热情，切实取得创新成果。创新型人才的成长也与其所处的环境密切相关，精神环境与物质环境共同组成人才成长所必需的整体环境。

注意：也有专家学者将环境因素区分为广义环境和实际环境。其中，广义环境是指系统外的一切事物，实际环境则是指与系统存在输出关系或输入关系的一切事物。例如“住宅开发系统”，实际环境涉及住宅如房型、质量、小区内的环境、配套设施等；也包括小区周边环境，诸如交通、学校、超市、医院、银行等设施；甚至还涉及社会经济发展、地区人口结构等大环境。



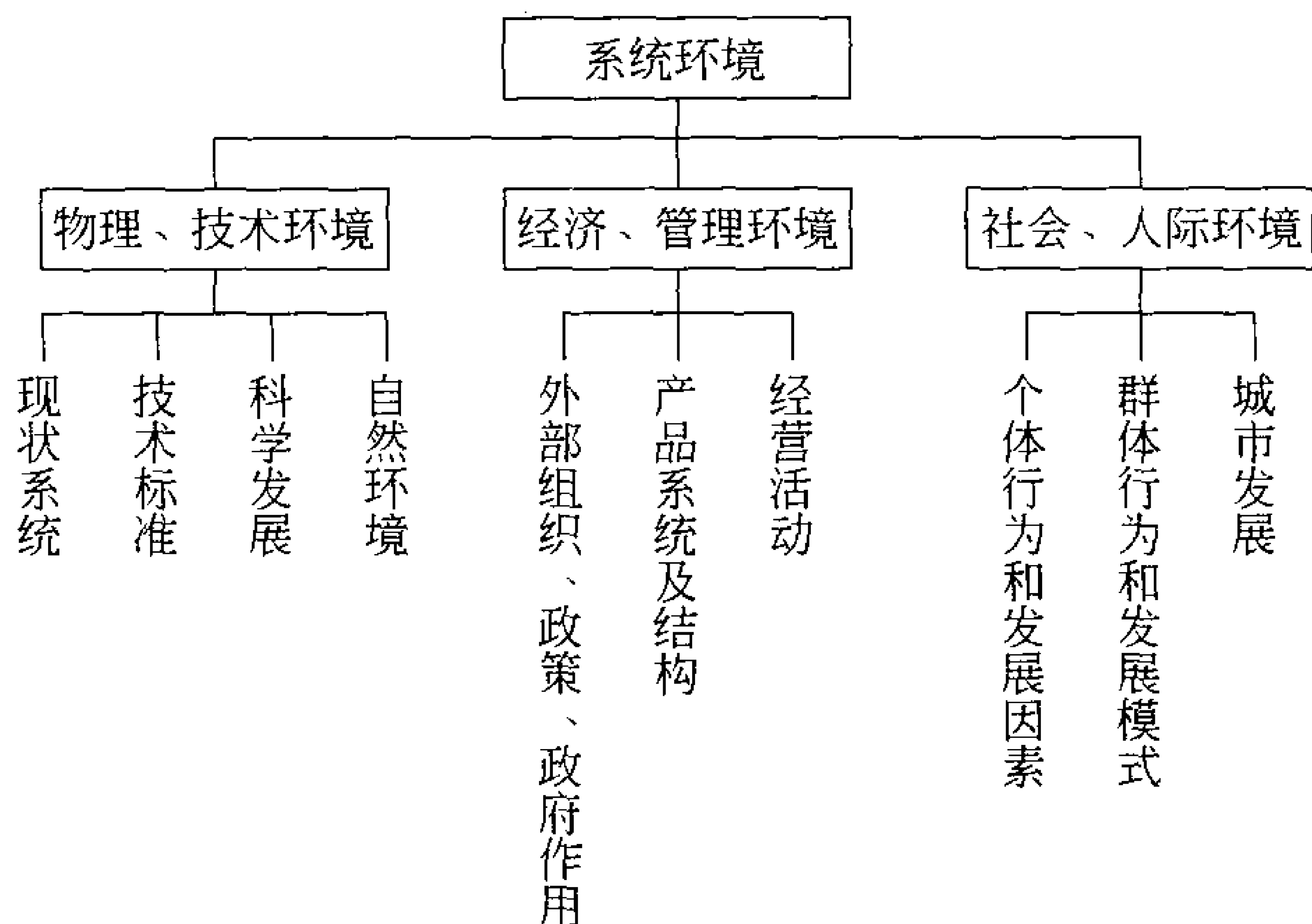


图 2-4　系统环境因素示意图

任何一个系统都存在于一定的环境之中，在系统与环境之间具有物质的、能量的、信息的交换。环境的变化必定对系统及其要素产生影响，从而引起系统及其要素的变化。系统要获得生存与发展，就必须适应外界环境的变化，这就是系统对于环境的适应性。

2.1.4　系统的分类

研究系统的重要基础之一是从不同的角度认识系统。

根据系统的反映属性和生成原因的不同，系统可以进行多种分类。

1. 系统属性分类

1）自然属性分类

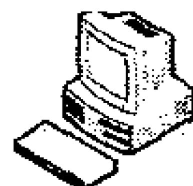
按照自然属性对系统进行分类，可以将系统分为自然系统和人造系统。

自然系统是指由自然物在自然过程中产生的系统。自然界中的原始系统都是自然系统。例如，太阳系、银河系等"天体系统"；山川河海及各种矿藏所构成的"地理系统"；各种原生物、植物、动物、微生物等构成的"生物系统"；森林、草原、荒漠、山地、河流、海洋等构成的"自然生态系统"。

人造系统是人类为达到某种预期目的，经过人们的劳动改造，由人工造就的要素组成的系统。例如，"人造卫星系统"，各种人工环境系统（人造森林、人造湖泊等），城市系统、国民经济系统、教育系统、工业系统、医疗卫生系统、社会保障系统、科学技术系统等都属于人造系统。

注意：在理解自然属性分类方法时，应注意以下几点。

(1) 人造系统都是存在于自然系统之中。如城市系统、国民经济系统、科学技术系统、社会保障系统、各种工程系统等，它们都是处在特定的自然环境中才能发挥作用。



(2) 人造系统和自然系统之间固然存在着一定的界面，但两者也是互相影响和渗透的。

(3) 自然系统及其规律是人造系统的基础。人造系统（如城市系统）在开发过程中往往会导致自然系统的破坏，造成各种公害。因此正确处理两者的关系（控制污染，保护环境）是系统工程的重要课题。

(4) 多数系统其构成要素中既有自然物又有人造物，都是自然系统和人造系统相结合的复合系统。如气象预报系统、农业系统、生态系统等。

2) 系统的要素构成属性分类

按照系统的要素构成属性对系统进行分类，可以将系统分为实体系统和概念系统。

实体系统是指构成系统的要素由具有物理属性的物质实体组成。例如，汽车、机械系统、计算机硬件系统、通信网络系统等都属于实体系统。

概念系统则由概念、原理、原则、方法、制度、规定、程序、政策等各种观念性的非物质实体构成。例如，管理信息系统、法律系统、教育系统、科学技术系统、国民经济系统等。

注意：在理解系统要素构成分类方法时，应注意以下两点。

(1) 在实际生活中，实体系统和概念系统往往是结合起来的。实体系统是概念系统的物质基础，而概念系统又是实体系统的中枢神经，为实体系统提供指导和服务，两者是不可分的。例如，管理信息系统中的计算机及其外部设备是实体系统，而运行的管理软件、数据库、应用程序就属于概念系统。

(2) 多数系统其构成要素中既有实体要素又有概念要素，这样的系统称为复合系统。例如一个企业，既有办公设备、生产原材料、产品等实体，同时也具备企业的管理信息系统（严格来说也属于复合系统的范畴）、管理制度等，这些属于概念系统。

3) 系统的要素状态属性分类

按照系统的要素状态属性可以将系统分为静态系统和动态系统。

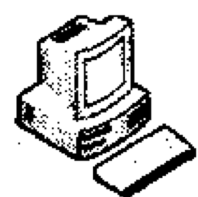
系统的结构参数不随时间变化的系统称为静态系统。例如实体网络系统，包括城市规划布局系统、交通网络图等都是静态系统。

动态系统是指系统状态变量、内部结构等参数随着时间的变化而变化的系统。例如运筹学中的动态规划系统、生命系统、服务系统、生产系统等。

注意：在理解静态系统和动态系统时，应注意以下两点。

(1) 没有绝对静止的系统。静态系统只是相对存在的，一般是指系统状态处于量变阶段，随时间推移，系统状态变动甚小可忽略不计的情况，它是动态系统在某一时刻或某一时段的描述。

(2) 动态系统需要以静态系统为基础，需要有概念系统的配合。事实上，静态系统是动态系统的极限稳定状态或简化假设状态。



4）系统和环境的关系属性分类

依据系统和环境的关系属性对系统进行分类，可以分为开放系统和封闭系统。

开放系统是指与系统外的某些事物有输入和输出关系的系统，或与外界环境进行物质、能量和信息交换的系统。社会工作和生活中存在着大量的开放系统。例如"学校系统"是一个特征显著的开放系统。要根据社会对人才的需求设定办学目标、制订培养计划、落实培养方案，向社会输出合格人才，它与社会、经济等环境不断进行着物质、能量和信息的交换。"生产系统"也是典型的开放系统。根据市场需求确定生产计划，其产品要被市场所接受。这些系统通过系统部件的不断调整，来适应周围环境的变化，以使其在某个阶段保持稳定的状态。因此，开放系统往往具有自适应特性。

封闭系统指系统与环境相互隔绝而孤立，系统与环境之间没有物质、能量和信息交换，呈封闭状态。

注意：在理解开放系统、封闭系统的概念时，应注意以下两点。

（1）系统的开放性与封闭性是相对的，绝对的封闭系统是不存在的。

（2）封闭系统是开放系统的近似和简化，是系统边界的相对明确。关键是正确认识系统的边界，正确认识系统属性变化与外界环境的关系。

5）系统要素属性认识度分类

按照认识程度对系统进行分类，系统可以被分为黑色系统、白色系统和灰色系统。

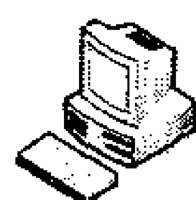
黑色系统是指系统的输入与输出关系明确，但是对于系统内部的结构、层次关系、组成元素和实现机理却一无所知的系统。例如，对于非计算机专业人员来说，计算机系统就是黑色系统。

白色系统是指系统与环境之间相互作用的关系明确，系统内部结构、元素和系统特性也明确的系统。

注意：黑色系统和白色系统的划分是相对的，这往往与认识的角度相关。例如，对于同一个管理信息系统，从用户角度分析属于黑色系统，用户只需要了解如何使用该系统，通过界面完成特定的操作即可，而不需要知道系统是怎样设计、运行的。但是对于该系统的研发人员来说，他们对系统的运行过程非常了解，因此，从研发人员的角度看，它又是一个白色系统。

对于输入与输出的关系以及实现过程只有部分认识的系统称为灰色系统。例如，农业系统就是灰色系统，农业系统中物质循环和能量交换的信息都是不完全的；"人体"也是一个信息不完全的灰色系统，虽然人体的血压、脉搏、身高、体重等信息已知，但有更多的信息未知。

在现实世界中，灰色系统是存在形式最多的一种，我们所面临和研究的大部分对象都是灰色系统。



2. 系统复杂程度分类

按照系统内子系统的复杂关系对系统进行分类，可以分为简单系统和复杂系统。

简单系统是指组成系统的子系统数量较少，关系也相对比较简单。或者尽管子系统数量多或巨大，但它们之间的关联关系比较简单。某些非生命系统可以称为简单小系统。例如一台机械设备，可视为小系统，这一类系统用传统的数学、物理学、化学等知识可以很好地描述。一个仅考虑产品生产的普通工厂，可视为一个简单大系统。研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为系统整体的功能。

复杂系统是指系统的结构复杂，系统的层次也相对较多，要素之间的关系复杂，关系种类多，最终形成具有多目标的多个方案，并且会涉及很多技术种类。复杂系统大多数具有不确定性。例如人体系统、地理系统、气象系统等都是复杂系统。

确定系统的复杂程度有很多方法，可以使用如下的简单方法来确定一个系统是简单系统还是复杂系统。设 $C=\frac{M}{N-1}$ 为系统的复杂度，其中，N 为系统要素个数，M 为系统要素的关系个数。则当 $C>1$ 时称为复杂系统，当 $C\leqslant 1$ 时称为简单系统。图 2-5 分别给出由 5 个要素组成的系统(a)和由 3 个要素组成的系统(b)。

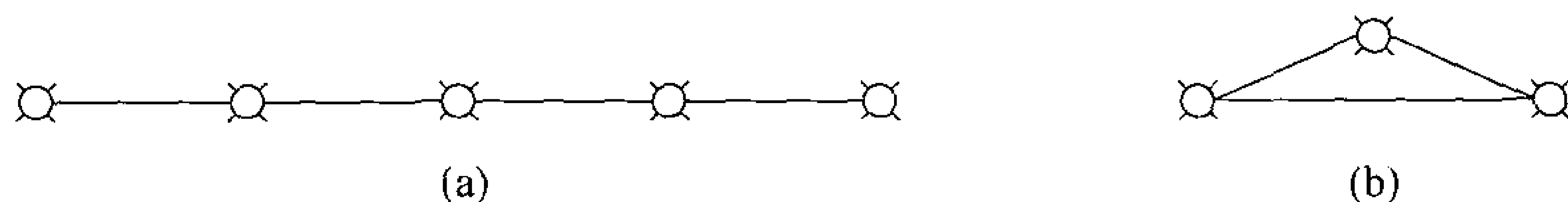


图 2-5　要素组成系统示意图

在图 2-5(a)中，$C=4/(5-1)=1$，所以是简单系统；在图 2-5(b)中，$C=3/(3-1)=1.5>1$，所以是复杂系统。

3. 钱学森院士的分类

我国科学家钱学森院士结合系统的大小、复杂程度两种分类标准，可以得到一种新的分类——钱学森系统分类，如图 2-6 所示。

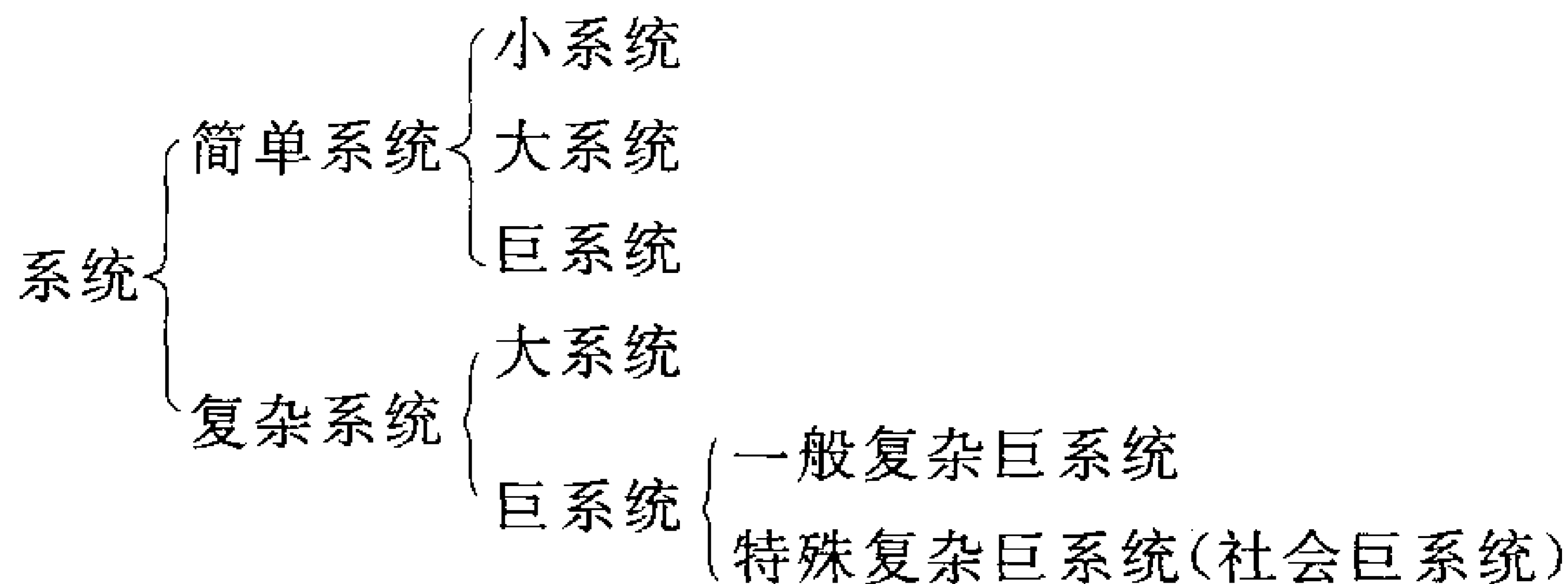
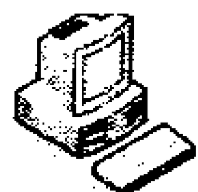


图 2-6　钱学森系统分类

例如，森林系统就是一个开放复杂巨系统。森林系统是由多种木本植物为主体的生



物群体和环境的统一体。它的元素是由不同树种的林木与生物组成的群落，具有极为丰富的多样性；而且不同林龄、不同种类的树木形成不同质的林分结构，即或大或小的群落；不同层次的生物群落构成了丰富多彩的森林景观的多样性，并构成了彼此间极为多样的相互关系。此外森林与环境之间不仅存在着物质与能量的交换，还有极其复杂的相互依存关系。因此，森林是陆地上现存最大的开放复杂巨系统。

钱学森院士很重视系统的开放性，倡导研究开放的复杂巨系统（open complex system）。他从社会形态和开放复杂巨系统的高度，论述了全国规模的社会系统就是一种开放的复杂巨系统。即任何一个社会的社会形态都有三个侧面：经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态。从而提出把社会系统划分为社会经济系统、社会政治系统和社会意识系统三个组成部分。从这里也可以看到，系统的开放程度与系统的复杂程度成正比，即开放程度越高系统越复杂。

2.1.5　系统的特性

1. 整体性

系统的整体性是指系统的各个组成元素和系统外部环境之间具有有机的联系，形成一个有机整体。例如由四肢和各种器官组成的人体。将各个器官分割开来就会失去整体的作用；由上万个零件组成的飞机、机械等。

注意：在理解系统的整体性特征时，应该注意以下几点。

(1) 系统的整体性使得系统具有各要素所没有的“新”的性质和行为方式，即作为整体一定要具有各组成部分自身单独所不具有的某种特定功能。

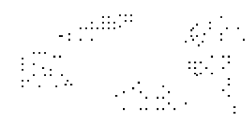
由成千上万个螺丝钉把各种零部件装配成的一部汽车，其整体功能是无法在单个螺丝钉上找出来的。

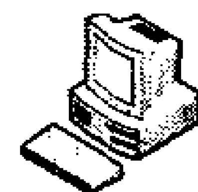
(2) 通常将一堆沙子、一袋苹果等这种因缺乏有机联系，各组成部分的数量、质料、堆积形式等对系统功能的影响甚小的整体，称为“非系统”联系的整体。

(3) 系统的整体性原则对现代化管理工作具有重要的指导意义，主要体现在：①依据确定的管理目标，把管理要素组成一个有机整体，协调并统一管理其中的各个要素，使管理整体产生放大效应，发挥出整体的优化功能；②不断改善单个元素的功能作为改进整体功能的基础，强调局部服从整体，提高弱化元素功能，实现管理系统的最佳整体功能；③注意调整要素的组织形式，建立合理的系统结构，改善和促进管理系统的整体功能优化。

2. 层次性

由于组成系统的诸要素的种种差异，使得系统组织在地位与作用、结构与功能上表现出等级秩序性，形成了具有质的差异的系统等级。系统的层次结构表述了不同层次子系





统之间的隶属关系或相互作用的关系，在不同层次结构中存在着的不同的运动形式，构成了系统的整体运动特性；下一层元素的功能逐层递级形成上一层元素的功能直至顶层。

图2-7所示为“教育系统”的层次结构。

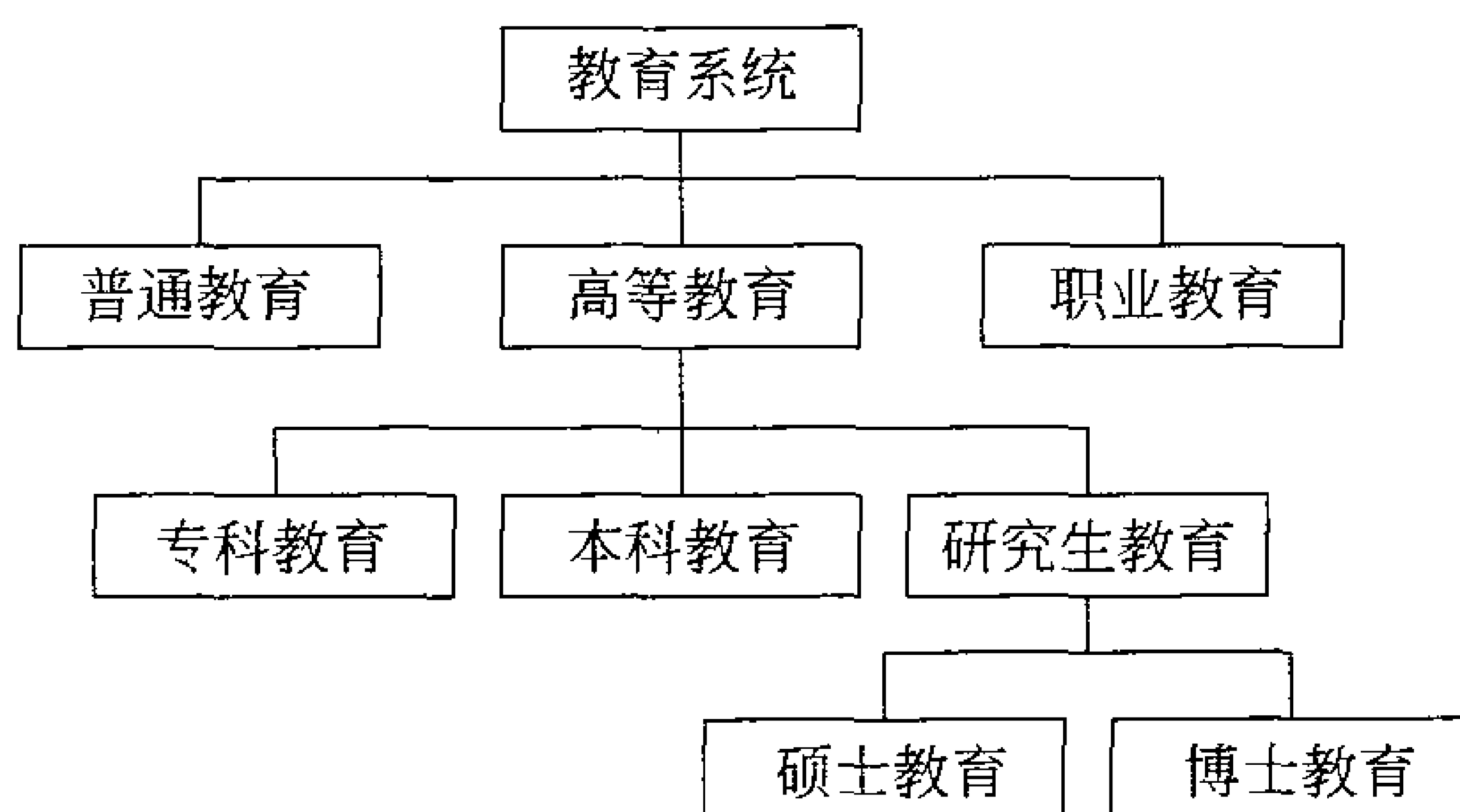


图2-7　教育系统的层次性

事实上，普通教育又可以再划分为小学教育、中学教育等；职业教育又可以细分为不同职业领域的教育。

注意：*在现代管理工作中，系统的层次性并非一成不变的。例如，上级指挥下级。但是在特殊情况下也可以“越级指挥”、“越级反映情况”等，这时称为不规范的层次性。*

3. 目的性

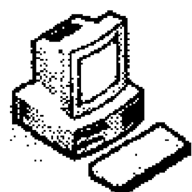
系统工程研究的系统都具有特定的目的。“目的”是指人们在行动中所要达到的结果和意愿。系统的目的是指人们根据实践的需要而确定所要达到的结果和意愿。系统的目的与功能相统一，是区别不同系统的标志。例如企业的经营目的是获取业绩，可以通过产量、产值等指标反映企业的经营目的是否达到，也可以通过成本、利润、质量等业绩指标来反映。

由于较大的系统往往具有多个目标，当组织规划大系统时，常采用图解的方法来描述目的与目的之间的相互关系，这种图解的方式称为目的树，如图2-8所示。通过目的树可以使各目的层次鲜明。

系统目的性原则要求人们正确地确定系统目标，从而用各种调节手段把系统导向预定的目标，达到系统整体最优的目的。现代化管理中的目标管理(MBO)，就是在系统目的性原则的指导下，使企业适应市场的变化，将经营目标的各项管理工作协调起来，完善经济责任制，体现现代企业管理的系统化、科学化、标准化和制度化。

4. 适应性

任何一个系统都存在于一定的环境之中。系统与环境互相融入，系统必然会和外部环境产生物质的、能量的、信息的交换。环境是一种更高级、更复杂的系统，在某些情况



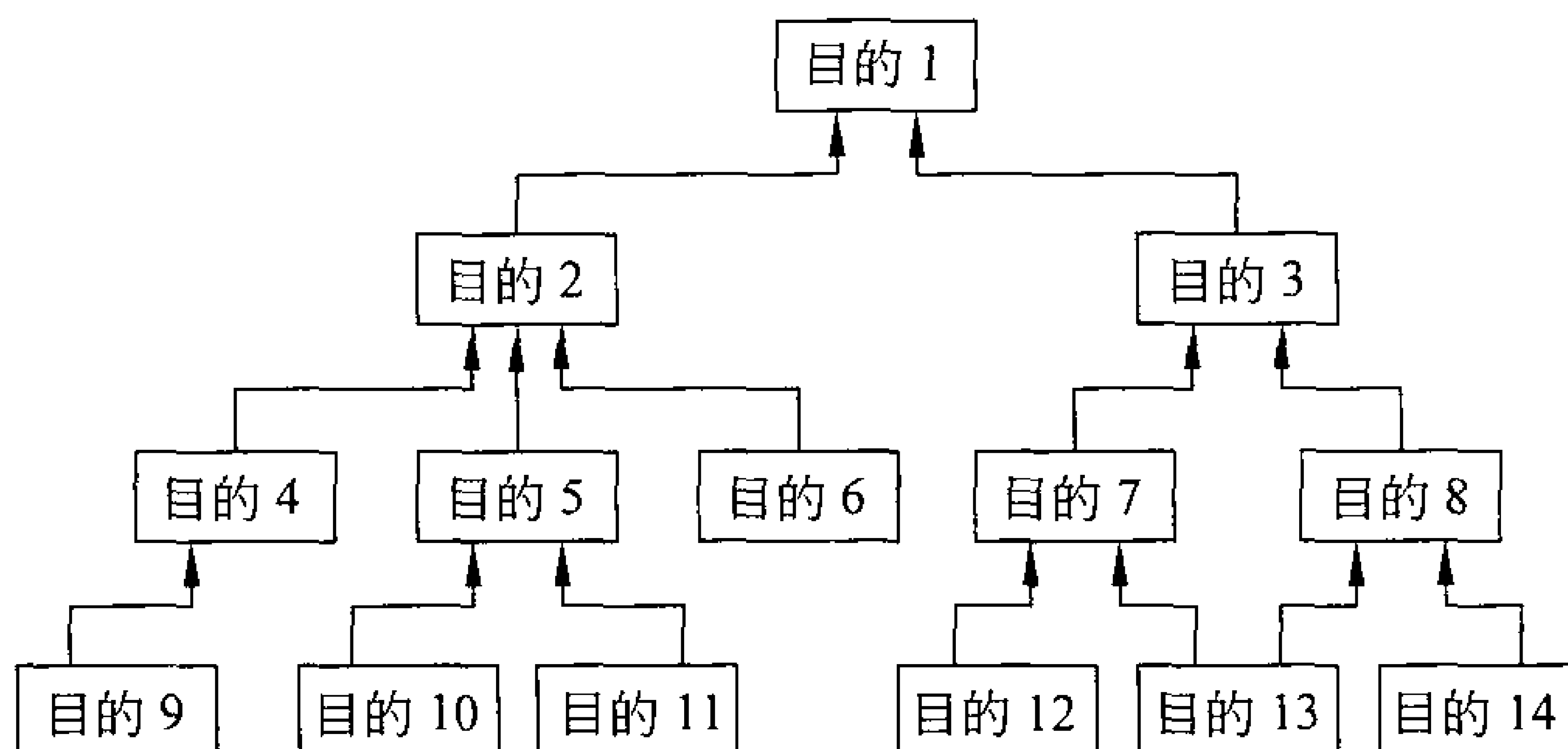


图 2-8　目的树图示

下，环境会限制系统功能的发挥，因此，系统必须适应外部环境的变化，与外部环境保持最佳适应状态才能够生存和发展。从企业角度来看，全球经济竞争激烈，商品生命周期缩短，在这种情况下，企业必须经常了解同行企业的动向、用户的需求、政府政策的修改、企业所处地区的文化氛围等环境信息，并从许多可选方案中选出最佳决策，否则企业就会面临生存危机。系统对环境的适应可以从内外两个方面加强，即调节系统的内部结构使系统适应周围环境，或者改变周围环境，使其适应系统发展的需要。

除了上面所说的这些基本特性以外，不同的系统可能还具有其他一系列特性。例如：动态性，系统的动态性是系统对外界输入的响应所具有的特性，由系统的内部结构和参数决定；稳定性，系统的稳定性是指系统的结构、状态、行为的恒定性，反映了系统的抗干扰能力，系统的干扰因素可以是影响系统的外部环境输入，也可以来自系统本身；还有可靠性、可控性、有序性等特性。

2.2　系统的一般描述

大千世界有各种各样的系统，每种系统的具体结构都不一样。大系统的结构往往比较复杂，而小系统则相对简单。从一般意义上说，可以通过以下两种方法对系统进行描述。

2.2.1　系统的框图描述

框图描述法是一种侧重从系统外部对系统进行描述的方法，见图 2-9。框图描述法不研究系统内部的构成，只考虑系统周围的环境及系统边界(环境与系统的分界叫做系统边界)对系统的影响，分析系统的输入和输出。

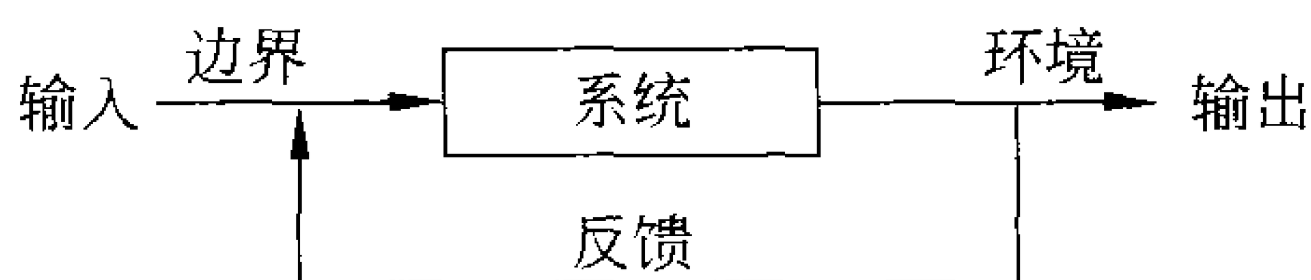
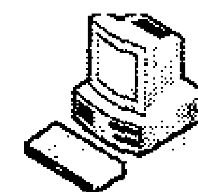


图 2-9　系统的框图描述法示意图

例如“计算机系统”，采用框图描述法对其



进行描述时，可以得到该系统的框图如图 2-10 所示。

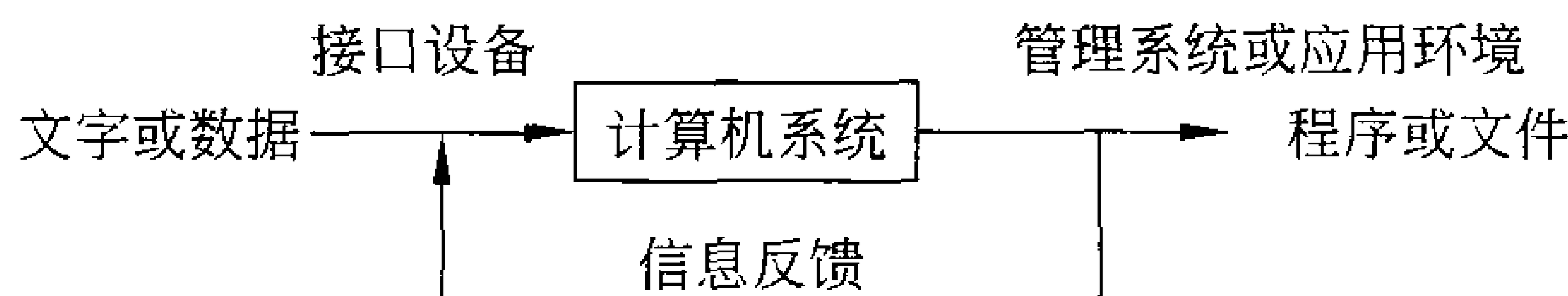


图 2-10 “计算机系统”的框图描述法

又如企业生产、管理“人-机系统”(见图 2-11)。该系统的输入为物质(必需的人力、物力、财力、动力等)、服务、管理、信息(包括上级命令、指示、布置的工作任务、文件、资料、情报等)。产品、成果、工作成绩等是每个部门的输出，还有各种信息输出，如管理效率、劳动生产率、进度、成本、合理化建议等，也伴随着对环境的污染、对社会的影响等。而政策、交通、相关竞争产品等又可以看成这个“人-机系统”的环境。

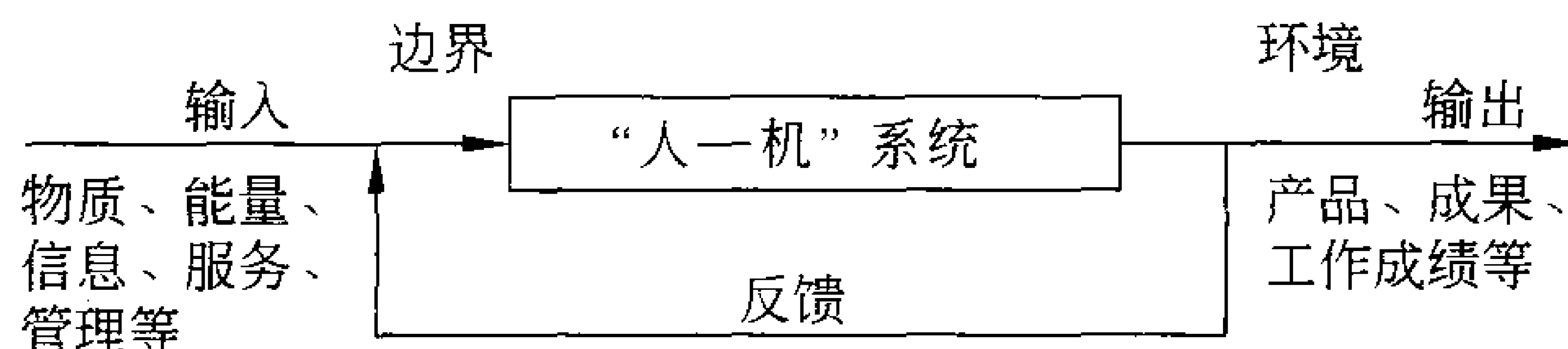


图 2-11 “人—机系统”框图描述示意图

2.2.2 系统的集合描述

系统的集合描述法是根据系统的“目标”，在一定的“约束”下，按其“关系”、“分布”在“要素”上产生的“功效”对系统进行描述的方法。集合描述法侧重描述系统的内部，着重分析系统的元素以及元素之间的各种关系。

在集合描述法中，系统可以用式子 Sys＝{Acts，Rels，Stru}来表示。式中，Sys 表示系统；Acts 表示元素的集合；Rels 表示元素之间各种关系的集合；Stru 表示元素按其“关系”的联系所呈现的一种分布结构。这种分布结构是指系统诸要素相互作用、相互依赖所构成的一种组织形式。

图 2-12 所示为某“学院行政组织管理系统”的集合描述法。

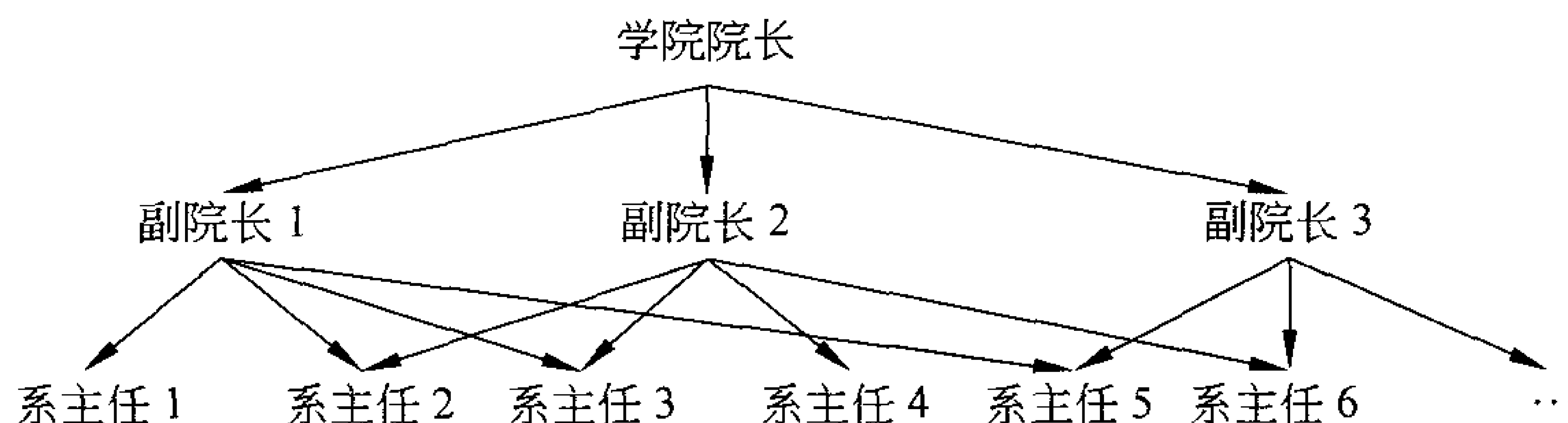
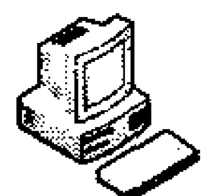


图 2-12 学院行政组织管理系统的集合描述法



从集合描述法角度来看,"学院行政组织管理系统"可以被描述成

$$Sys=\{Acts,Rels,Stru\}$$

其中: Acts={学院院长、副院长1、副院长2、副院长3、系主任1、系主任2、系主任3、系主任4、系主任5、系主任6、…}=$\{S_1,S_2,\cdots,S_n\}$称为系统的要素集;Rels=$\{r_1,r_2,\cdots,r_m\}$称为系统的关系集,例如$S_1(r_1)S_2$表示院长与副院长1有组织关系r_1;Stru表示"要素"与"关系"具有如图2-12这种组织形式的结构分布。

注意:(1) 从集合描述法来看一个系统,必须包括元素的集合、元素之间关系的集合和元素的一种组织结构,三者缺一不可。再考虑到系统周围环境的约束条件,才能决定系统的功能目标。

(2) 确定系统的要素一般应遵循以下基本原则:

- 对研究问题具有举足轻重作用的要素。例如,计算机硬件系统,由运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备以及联系这些部件的总线等要素构成,这些要素主导着计算机硬件系统的功能作用,而无须考虑机壳、螺丝钉等这些对计算机硬件系统的功能作用不大的要素。
- 能由系统的设计和系统的运营得到控制和调节的要素。例如,养老保险基金运营系统。养老保险基金的"征收"和"发放"是可以控制和调节的量,可以作为养老保险基金运营系统的重要构成元素。
- 能对系统的行为产生直接影响的要素。例如,"生产系统"。考虑成本问题时,则考虑对生产系统的成本产生直接影响的水电费、工资、管理费等要素。

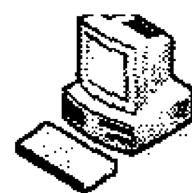
2.3 系统的结构成分

系统的集合描述法 Sys={Acts,Rels,Stru}告诉我们,作为一个系统,必须包括元素的集合(Acts)、元素之间关系的集合(Rels)和元素的组织结构(Stru),这三者称为系统的结构成分。

1. 系统的元素集 Acts

"元素"是构成系统的相互关联的基本单元。通常,记元素为S_i,$i=1,2,\cdots,n$,则Acts=$\{S_i/i=1,2,\cdots,n\}$称为系统的要素集。

要素的概念很广泛,诸如人、物等有形实体要素;也可以是概念、制度、条文、项目、信息等无形的非实体要素。例如:"计算机硬件系统"的构成要素包括运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备及联系这些部件的总线等实体要素;"学校系统"构成要素除了包括学生、教师等人员,各种设备等实体要素,还包括学校制定的如学生、教师等管理条例,



制度，条文，项目，信息等非实体要素。

注意：在理解“要素”的内涵时，应注意以下两点。

(1) 构成系统的要素可大可小，也就是前面所说的子系统概念。

例如，社会保险系统是由“养老保险”、“医疗保险”、“失业保险”、“工伤与生育保险”这些子系统作为元素构成“社会保险系统”。养老保险系统由“人均社会平均工资”、“缴费人数”、“单位缴费比例”、“个人缴费比例”、“领取人数”、“利率”、“工资增长率”、“新增加工作人数”等元素组成。

(2) 研究系统首先要区分要素的种类，如定量要素与定性要素、经济要素与社会要素等。需要明确要素的各种度量单位及量值。例如，人口系统的数量要素包括人口总数、男女总数等；同时，该系统还具有质量要素，包括受教育程度、在校大学生人数、文盲率等；人口发展要素包括生育率、出生率、死亡率等。

2. 系统的关系集 Rels

“关系”是指系统中不同要素之间相互依存、相互作用的状态。通常，记要素 S_i 与要素 S_j 之间的关系为 r_{ij}，则 $\text{Rels}=\{r_{ij}/i,j=1,2,\cdots,n\}$ 称为系统的关系集。

现实世界中存在着各种各样的关系。例如，人与人之间的“同志”、“上下级”等关系；家庭中“夫妻”、“父子、女”、“母子、女”、“兄弟姐妹”等关系；两个数之间的“大于”、“小于”等关系；各种农作物与各类土地间的“适宜种植”、“不适宜种植”关系等。

注意：在理解“关系”的内涵时，应注意以下几点。

(1)“关系”可以在空间结构、排列顺序、数量比例、信息传递、组织形式、操作程序、管理方法等方面体现出。例如，在投资与消费系统中，不同的投资与消费比例决定了不同的系统结构关系；不同的食品配料成分、数量比例不同，可以有不同的产品。

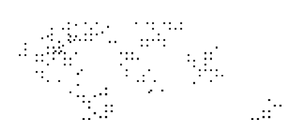
(2) 从关系角度来看，同样的元素，排列组合不同、连接形式不同、数量比例不同等都会形成不同的系统结构，表现出不同的系统功能。金刚石和石墨的化学成分都是碳，但两者原子排列结构不同，因而具有完全不同的性能：金刚石是外观透明、不导电、硬度高的立方晶体结构，石墨则是不透明、导电、硬度低的鳞片状晶体结构。

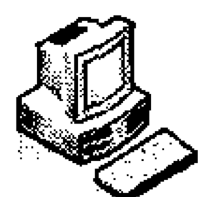
(3) 两个系统的要素集完全相同，如果它们的关系集不同，则是两个不同的系统。

将系统要素的所有关系简单地分为直接关系和间接关系，直接关系又称为二元关系，能够直接量化表示为：如果元素 S_i 与元素 S_j 有直接关系，则记 $a_{i,j}=1$，否则记 $a_{i,j}=0$。即

$$a_{i,j}=\begin{cases}1, & S_i \text{ 与 } S_j \text{ 有直接关系}\\0, & S_i \text{ 与 } S_j \text{ 无直接关系}\end{cases}$$

例如，某专业教学质量制约因素两两关系如表 2-1 所示。表中单元格内数字为 1 表示





两个制约因素之间有直接关系，空白(省略 0)单元格表示两个制约因素之间没有直接关系。

表 2-1　某专业教学质量制约因素二元关系表

	教材、专业资源缺乏(S_1)	课程设置不合理(S_2)	专业基础课脱节(S_3)	上机操作时间太少(S_4)	师资力量不足(S_5)	学生学习积极性不高(S_6)	社会实践机会少(S_7)	学生专业思想认识不够(S_8)	教学质量不高(S_9)
教材、专业资源缺乏(S_1)	1					1		1	1
课程设置不合理(S_2)		1	1			1			1
专业基础课脱节(S_3)			1			1			1
上机操作时间太少(S_4)				1		1	1		1
师资力量不足(S_5)		1	1	1	1	1	1		1
学生学习积极性不高(S_6)						1			1
社会实践机会少(S_7)						1	1	1	1
学生专业思想认识不够(S_8)						1		1	1
教学质量不高(S_9)						1		1	1

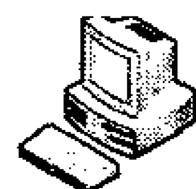
注：这是某校某专业毕业生某年对该专业教学质量调查的内容。

表 2-1 的第一行 $a_{1,6}=a_{1,8}=a_{1,9}=1$，表示 S_1 与 S_6、S_1 与 S_8、S_1 与 S_9 有直接关系；$a_{1,2}=a_{1,3}=a_{1,4}=a_{1,5}=a_{1,7}=0$，表示 S_1 与 S_2，S_3，S_4，S_5，S_7 这些元素无直接关系。

3. 系统元素的结构分布 Stru

“分布”是指系统的要素集与关系集在阶层排列次序上的一种形式。不同的领导层次，得到不同分布形式的组织系统。

注意：在理解“分布”的内涵时要注意，如果两个系统的要素集和关系集都相同，但是它们的分布 Stru 不同，仍然是两个不同的系统。例如“具有手特征的系统”，其左手系与右手系是具有相同要素集、相同关系集但分布不同(一个是左手分布；另一个是右手分布)的两个系统。按照安排方案的不同，生产的组织、安排也会有不同的输出，往往一种组织、安排方案决定了一种系统结构分布。



在这里我们要说到第 1 章提出的一个重要概念，即“系统性问题”。第 1 章中提及的“系统性问题”只是“问题集”，真正的含义在这里可以得到一定深度的理解。例如，表 2-1 给出的某专业教学质量制约因素，这些因素正是制约教学质量提高的一个个“问题”，因此构成系统的因素集是由一个个“问题”要素构成，再给出这些“问题”要素之间的关系和分布，就可以得到由教学质量制约因素即“问题集”构成的系统，这就是“系统性问题”的本质。

2.4　系统的结构分析

由系统的构成成分可知，系统必须包括元素的集合、元素之间关系的集合和元素的组织结构，三者结合起来，再考虑到周围环境的约束条件，才能决定一个系统的功能目标。在针对多因素的系统时，往往分析清楚各因素之间的结构关系是研究该系统的必备步骤，这就需要对系统进行结构分析。

2.4.1　系统的解释结构分析方法

结构模型是图形模型中最重要的刻画大规模复杂系统结构特征的系统结构分析方法。建立系统结构模型的方法包括只着眼于系统组成要素间有无关联的 ISM(解释结构模型)方法、用具体数值表示关联度的 FSM(模糊结构模型)方法、DEMATEL(决策试行和评价试验室)方法等。这里我们将介绍最具代表性且应用越来越广泛的 ISM 方法，它也是前面所说的对系统进行描述的两种方法中的集合描述方法。

系统解释结构模型(interpretative structural modeling, ISM)方法是美国沃菲尔德(J. Warfield)教授于 1973 年为分析复杂社会经济系统问题而开发的一种系统分析方法。该方法已经被现代系统工程广泛应用于对系统结构进行分析。ISM 方法能够利用系统要素之间已知的，但凌乱的关系，揭示出系统的内部结构，用于分析复杂系统要素间关联结构。其基本方法是先用图形和矩阵描述各种已知的关系，在矩阵的基础上再进一步运算、推导来解释系统结构的特点。

ISM 方法的基本步骤如下：

设

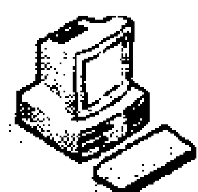
$$\text{Sys}=\{\text{Acts},\text{Rels},\text{Stru}\} \tag{2-1}$$

式中，Sys 表示系统；Acts 表示系统的要素集合；Rels 表示要素之间各种关系的集合；Stru 表示系统的一种组织形式(分布结构)。

第一步，确定系统的要素集 Acts。

第二步，建立系统要素之间的二元关系表，并建立邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$。

第三步，通过邻接矩阵运算求出该系统的可达矩阵 $\boldsymbol{R}$，得到系统的关系集 Rels。



第四步，对可达矩阵 $\boldsymbol{R}$ 进行区域分解和级间划分，得到系统的分布结构 Stru。

第五步，绘制出系统的解释结构图。

物理系统的元素关系清晰，下面通过一个具体的水槽系统实例介绍用 ISM 方法构建系统解释结构的过程。

例 2-1 由流入水量、流出水量、液体密度、液面高度和水压五个元素构成的水槽系统的物理图示如图 2-13 所示，要求给出水槽系统的解释结构图。

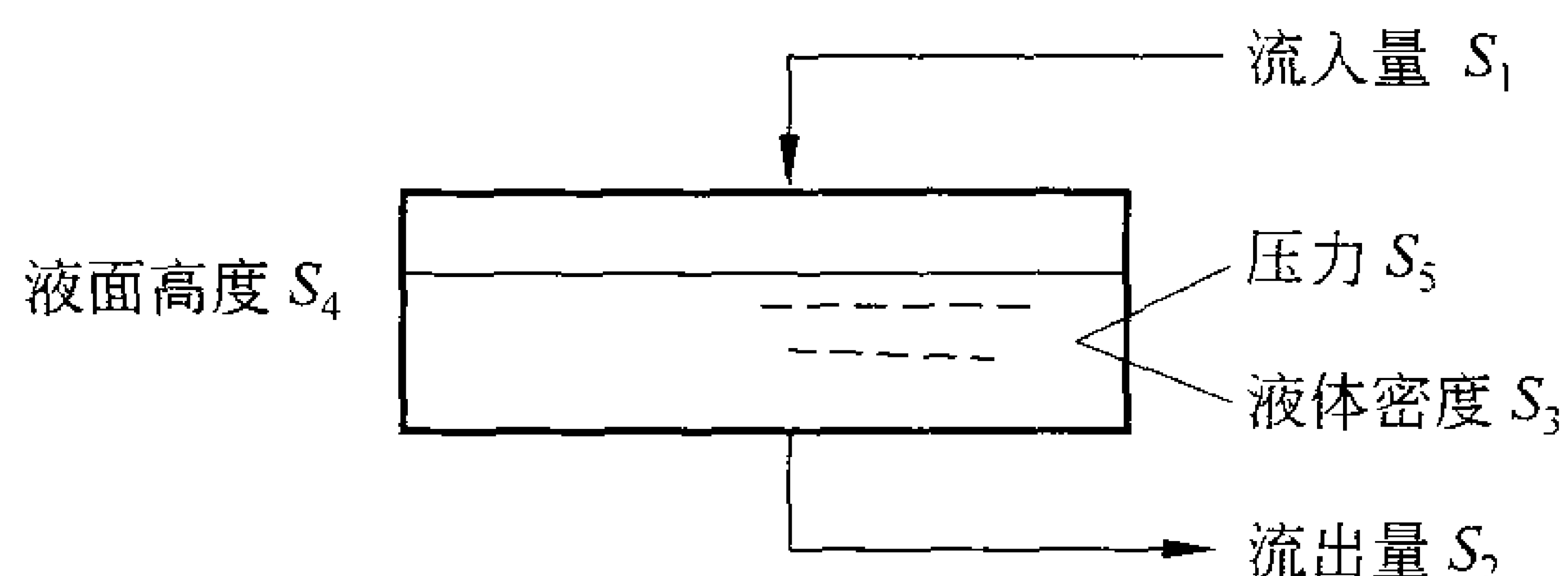


图 2-13 水槽系统

下面用 ISM 方法给出水槽系统的解释结构。

1. 确定系统的要素集 Acts

对于图 2-13 所示的水槽系统，其构成要素集为

$$\begin{aligned}\text{Acts} &= \{\text{流入量},\text{流出量},\text{液体密度},\text{液面高度},\text{压力}\}\\ &= \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}\end{aligned}$$

2. 建立系统要素之间的二元关系矩阵，即邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$

根据元素 S_i 对 S_j 有无直接影响关系，可以建立要素之间的二元关系：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有直接影响} \\ 0, & \text{当 } S_i \text{ 对 } S_j \text{ 没有直接影响} \end{cases} \tag{2-2}$$

用矩阵表示二元关系，也称为邻接矩阵，记为 $\boldsymbol{A}$：

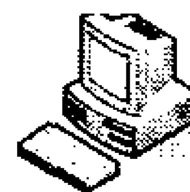
$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. 求出系统的可达矩阵(reach matrix)，得系统的关系集 Rels

(1) 采用布尔矩阵运算求解可达矩阵。布尔矩阵运算规则主要有如下几个。

① 如果 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 都是 $n \cdot n$ 布尔矩阵，则 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的逻辑和 $\boldsymbol{A} \cup \boldsymbol{B} = \boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{C}$ 也是布尔矩阵，且

$$c_{ij} = a_{ij} \cup b_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\} \tag{2-3}$$



② 如果 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 都是 $n \cdot n$ 布尔矩阵，则 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的逻辑乘 $\boldsymbol{A} \cap \boldsymbol{B} = \boldsymbol{D}$，$\boldsymbol{D}$ 也是布尔矩阵，且

$$d_{ij} = a_{ij} \cap b_{ij} = \min\{a_{ij}, b_{ij}\} \tag{2-4}$$

③ 如果 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 都是 $n \cdot n$ 布尔矩阵，则 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的乘积 $\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B} = \boldsymbol{E}$，$\boldsymbol{E}$ 也是布尔矩阵，且

$$\begin{aligned} e_{ij} &= (a_{i1} \cap b_{1j}) \cup (a_{i2} \cap b_{2j}) \cup \cdots \cup (a_{in} \cap b_{nj}) = \bigcup_{k=1}^{n} (a_{ik} \cap b_{kj}) \\ &= \max\{\min(a_{i1}, a_{1j}), \min(a_{i2}, a_{2j}), \cdots, \min(a_{in}, a_{nj})\} \end{aligned} \tag{2-5}$$

(2) 由邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 求可达矩阵 $\boldsymbol{R}$。

① “可达”的概念：“可达”指的是在系统所要探讨的各元素中，任意两个元素之间是否存在直接或间接的联系。

在例 2-1 的邻接矩阵中，$a_{14}=1$ 表示元素 S_1 与 S_4 有直接联系（称为 1 级可达影响关系）；$a_{15}=0$，表示元素 S_1 与 S_5 没有直接联系。再看图 2-14。

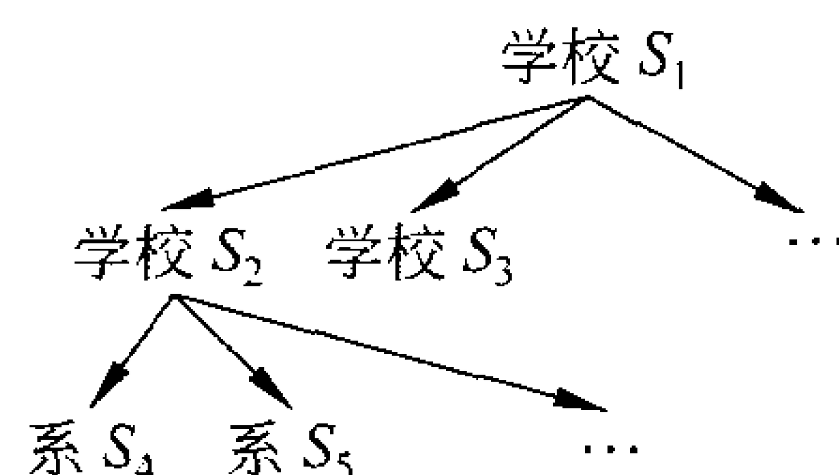


图 2-14　学校院系组织结构示意图

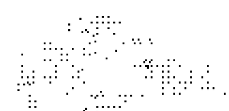
在图 2-14 中，S_1 与 S_5 没有直接影响关系，因此有 $a_{15}=0$。但是 S_1 与 S_5 有间接影响关系，即 S_1 通过一个中间元素 S_2 可以到达 S_5（简称 S_1 可达 S_5）。在这种情况下，又称 S_1 与 S_5 有 2 级可达影响关系。

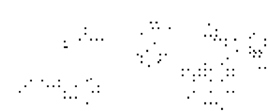
在得出元素之间可达（有联系）的条件下，如何求出这些“多级”可达影响关系值得我们关注。如例 2-1，记 $R^{(1)} = \boldsymbol{A} = (r_{ij}^{(1)})$，$\boldsymbol{R}^{(2)} = \boldsymbol{A} \circ \boldsymbol{A} = (r_{ij}^{(2)})$，其中“$\circ$”采用布尔矩阵运算式(2-4)。则

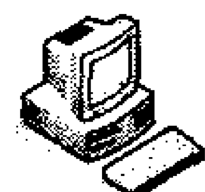
$$\boldsymbol{R}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在 $\boldsymbol{R}^{(2)}$ 中，$r_{15}^{(2)}=1$，它是由 $\boldsymbol{R}^{(1)} = \boldsymbol{A}$ 的第 1 行与第 5 列求合成运算得到，即

$$\begin{aligned} (1\ 0\ 0\ 1\ 0) \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} &= \max(\min(1,0), \min(0,0), \min(0,1), \min(1,1), \min(0,1)) \\ &= \max(0,0,0,1,0) \\ &= 1 \end{aligned}$$







由 $r_{15}^{(2)}=1$ 说明，S_1 与 S_5 之间有 2 级可达影响关系。

由此可知，系统元素集 Acts 中那些有级为 2 的可达影响关系，它们的关系值在 $\boldsymbol{R}^{(2)}$ 中为 1。同理，当系统元素集 Acts 中那些有级为 n 的可达影响关系时，它们的关系值在 $\boldsymbol{R}^{(n)}$ 中为 1。

② 求可达矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})$ 的具体步骤如下。

记

$$\boldsymbol{R}^{(n)}=\boldsymbol{A}\circ\boldsymbol{A}\circ\cdots\circ\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}^{(n-1)}\circ\boldsymbol{A} \tag{2-6}$$

如果 $\boldsymbol{R}^{(n-1)}\neq\boldsymbol{R}^{(n)}$，但 $\boldsymbol{R}^{(n)}=\boldsymbol{R}^{(n+1)}$，则称 $\boldsymbol{R}^{(n)}$ 为系统元素的可达矩阵，记为 $\boldsymbol{R}$。

$$\text{即 }\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}^{(n)}\quad\text{或}\quad\boldsymbol{R}=(r_{ij})=\boldsymbol{I}\circ\boldsymbol{A}\circ\boldsymbol{A}\circ\cdots\circ\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{I}\circ\boldsymbol{A})^{n} \tag{2-7}$$

在计算结果 $\boldsymbol{R}$ 中，当$(r_{ij})=1$ 时，表明 S_i 可以到达 S_j(不管长度 n 为多少，即中间经过多少个元素到达)；当$(r_{ij})=0$ 时，表明 S_i 不可以到达 S_j。

下面求例 2-1 的可达矩阵 $\boldsymbol{R}$：

$$\boldsymbol{R}^{(2)}=\begin{bmatrix}1&1&0&1&1\\0&1&0&1&1\\0&0&1&0&1\\0&1&0&1&1\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}^{(3)}=\boldsymbol{R}^{(2)}\circ\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1&1&0&1&1\\0&1&0&1&1\\0&0&1&0&1\\0&1&0&1&1\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}\circ\begin{bmatrix}1&0&0&1&0\\0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1\\0&1&0&1&1\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&0&1&1\\0&1&0&1&1\\0&0&1&0&1\\0&1&0&1&1\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}$$

因为 $\boldsymbol{R}^{(3)}=\boldsymbol{R}^{(2)}$，所以可达矩阵 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}^{(2)}$。

4. 确定系统关系集 Rels 的分布结构 Stru

(1) 将系统元素划分级次。

求元素 S_i 的可达集 $R(S_i)$及其前因集 $A(S_j)$，其中 $R(S_i)$和 $A(S_j)$的具体含义是指：

$R(S_i)$＝{与 S_i 同级且有强连通关系的所有元素}

＝{可达矩阵 R 中第 i 行所有元素为 1 的列所对应的元素}

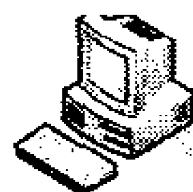
$A(S_j)$＝{到达元素 S_j 的所有元素}

＝{与 S_j 有强连通关系的下一级元素}

＝{可达矩阵 R 中第 j 列所有元素为 1 的行所对应的元素}

(2) 进行分层级划分。具体做法如下：

定义：设 $L_0=\varnothing$空集，集合 $L_1,L_2,\cdots,L_k$ 表示从上到下的级次，记



$$\pi_L(S) = [L_1, L_2, \cdots, L_k]$$

其中 L_k 的算法为

$$L_k = \{S_i \in S - L_0 - \cdots - L_{k-1}(S_i) / R_{k-1}(S_i) \cap A_{k-1}(S_i) = R_{k-1}(S_i)\} \tag{2-8}$$

最终得分层结果。

按照(1)和(2),例 2-1 的分层级划分结构如表 2-2(a)所示。为方便起见,在表 2-2(a)中,用 1,2,3,4,5 分别表示 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5。

表 2-2(a) 元素分层级划分计算表

元素 S_i		可达集 $R(S_i)$	前因集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$
	S_1	{1,2,4,5}	{1}	{1}	
	S_2	{2,4,5}	{1,2,4}	{2,4}	
$S-L_0$	S_3	{3,5}	{3}	{3}	S_5
	S_4	{2,4,5}	{1,2,4}	{2,4}	
	S_5	{5}	{1,2,3,4,5}	{5}	

由此得第一层元素集(又称为第 1 级次),记为 $L_1 = \{S_5\}$。

将表 2-2(a)划去 S_5 继续同样的计算,得表 2-2(b)。

表 2-2(b) 元素分层级划分计算表

元素 S_i		可达集 $R(S_i)$	前因集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$
	S_1	{1,2,4}	{1}	{1}	
	S_2	{2,4}	{1,2,4}	{2,4}	S_3, S_2, S_4
$S-L_0-L_1$	S_3	{3}	{3}	{3}	
	S_4	{2,4}	{1,2,4}	{2,4}	

由此得第二层元素集(又称为第 2 级次),记为 $L_2 = \{S_3, S_2, S_4\}$;

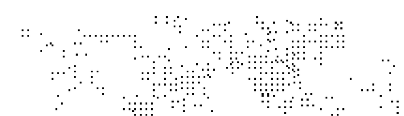
再划去表 2-2(b)中的 S_3, S_2, S_4,此时只剩下最后一个元素 S_1,因此得第三层元素集(又称为第 3 级次),记为 $L_3 = \{S_1\}$。

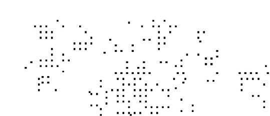
综合得分层结果:

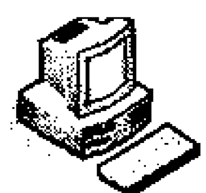
$$\pi_L(S) = [L_1, L_2, L_3] = [\{S_5\}, \{S_3, S_2, S_4\}, \{S_1\}]$$

5. 绘制系统的层次结构图

(1) 将可达矩阵 $\boldsymbol{R}$ 按照级次划分 L_1, L_2, L_3 重新排列行与列,得强连通矩阵:







$$
\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1&1&0&1&1\\0&1&0&1&1\\0&0&1&0&1\\0&1&0&1&1\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{R}'=\begin{array}{c}\\ S_5\\S_3\\S_2\\S_4\\S_1\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}S_5&S_3&S_2&S_4&S_1\end{array}\\ \left[\begin{array}{c|cccc}1&0&0&0&0\\\hline 1&1&0&0&0\\1&0&1&1&0\\1&0&1&1&0\\1&0&1&1&1\end{array}\right]\\ \begin{array}{cccc}S_5&S_3&\begin{matrix}S_2\\S_4\end{matrix}&S_1\end{array}\end{array}
$$

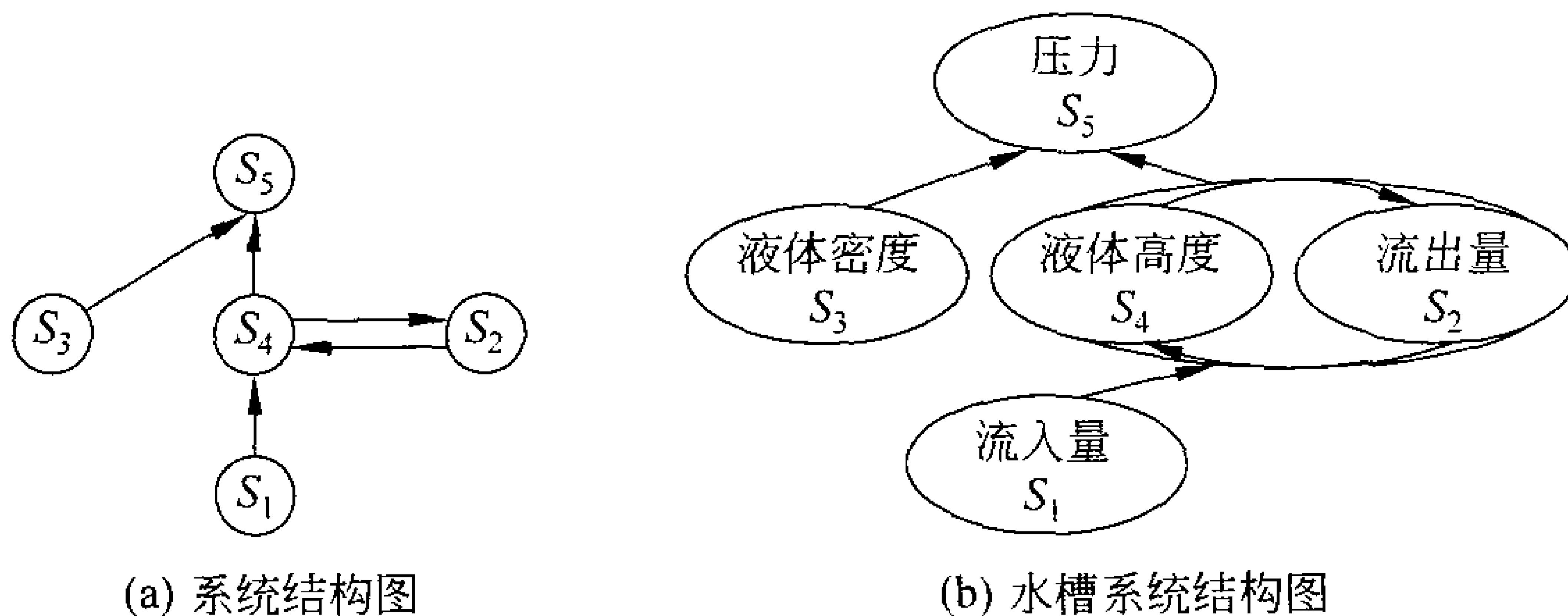
化简为

$$
\begin{array}{c}S_5\\S_3\\S_2,S_4\\S_1\end{array}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\1&1&0&0\\1&0&1&0\\1&0&1&1\end{bmatrix} \tag{2-9}
$$

(2) 画出系统结构图。

由式(2-8)可以给出系统的解释结构，如图 2-15(a)所示。

图 2-15(b)所示为应用 ISM 方法得到的 5 个元素构成的水槽系统的解释结构。



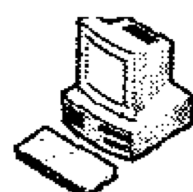
(a) 系统结构图　　(b) 水槽系统结构图

图 2-15

在实际应用中，ISM 方法能够清晰地给出所研究系统的内部结构，这是系统工程研究系统的第一步，在此基础上就可以对系统进行综合评价、系统决策等工作。

2.4.2 系统结构分析应用

例 2-2 本例以某个已经运转 2 年的新专业为实证研究对象，通过对该专业的学生调



研，汇总出制约该专业发展的 9 个要素：教材、专业资源缺乏，课程设置不合理，专业基础课脱节，上机操作时间太少，师资力量不足，学生学习积极性不高，社会实践机会少，学生专业思想认识不够，教学质量不高。

1. 确定系统的因素集 Acts

将制约该专业发展的 9 个因素用 $S_i, i=1,2,\cdots,9$ 表示，因素集 Acts 为：Acts={教材、专业资源缺乏，课程设置不合理，专业基础课脱节，上机操作时间太少，师资力量不足，学生学习积极性不高，社会实践机会少，学生专业思想认识不够，教学质量不高}，则

$$\text{Acts} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9\}$$

2. 确定系统的关系集 Rels

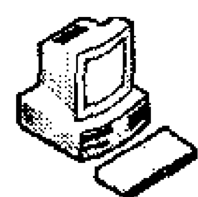
首先，建立系统要素二元关系表。表 2-1 给出了 9 个制约因素之间的二元制约关系，表中 1 表示相应的行因素对列因素有直接制约关系；空白表示相应的行因素对列因素没有直接影响关系。

其次，根据二元关系表建立邻接矩阵 **A**。根据表 2-1，可以建立二元关系邻接矩阵 **A** 为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

最后，求可达矩阵，得系统的关系集 Rels。由公式(2-7)，运用计算机软件(如 MATLAB 应用软件)计算得到可达矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



3. 确定系统的层次结构 Stru

将各元素按级划分，级划分步骤见表 2-3(a)，为方便起见，元素 $S_i(i=1,2,\cdots,9)$在表中用数字 $i(i=1,2,\cdots,9)$表示。

表 2-3(a)　级划分计算表

元素 S_i	可达集 $R(S_i)$	前因集 $A(S_i)$	$R(S_i)\cap A(S_i)$
S_1	{1,6,8,9}	{1}	{1}
S_2	{2,3,6,8,9}	{2,5}	{2}
S_3	{3,6,8,9}	{2,3,5}	{3}
S_4	{4,6,7,8,9}	{4,5}	{4}
S_5	{2,3,4,5,6,7,8,9}	{5}	{5}
S_6	{6,8,9}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9}	{6,8,9}
S_7	{6,7,8,9}	{4,5,7}	{7}
S_8	{6,8,9}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9}	{6,8,9}
S_9	{6,8,9}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9}	{6,8,9}

因为 $R(S_6)\cap A(S_6)=R(S_6)$、$R(S_8)\cap A(S_8)=R(S_8)$、$R(S_9)\cap A(S_9)=R(S_9)$，由此得一级元素集 $L_1=\{S_6,S_8,S_9\}$。划去表 2-3(a)中因素 S_6，S_8 和 S_9，继续同样的计算，得表 2-3(b)。

表 2-3(b)　级划分计算表

元素 S_i	可达集 $R(S_i)$	前因集 $A(S_i)$	$R(S_i)\cap A(S_i)$
S_1	{1}	{1}	{1}
S_2	{2,3}	{2,5}	{2}
S_3	{3}	{2,3,5}	{3}
S_4	{4,7}	{4,5}	{4}
S_5	{2,3,4,5,7}	{5}	{5}
S_7	{7}	{4,5,7}	{7}

因为 $R(S_1)\cap A(S_1)=R(S_1)$、$R(S_3)\cap A(S_3)=R(S_3)$、$R(S_7)\cap A(S_7)=R(S_7)$，由此得二级元素集 $L_2=\{S_1,S_3,S_7\}$。再将表 2-3(b)中的因素 S_1，S_3 和 S_7 划去，继续计算，得表 2-3(c)。

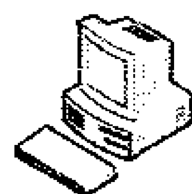


表 2-3(c)　级划分计算表

元素 S_i	可达集 $R(S_i)$	前因集 $A(S_i)$	$R(S_i)\cap A(S_i)$
S_2	{2}	{2,5}	{2}
S_4	{4}	{4,5}	{4}
S_5	{2,4,5}	{5}	{5}

因为 $R(S_2)\cap A(S_2)=R(S_2)$、$R(S_4)\cap A(S_4)=R(S_4)$，由此得三级元素集 $L_3=\{S_2,S_4\}$。划去表 2-3(c)中的元素 S_2 和 S_4，最后只剩下一个元素 S_5，这就是最后一级，也即第四级元素集所含的因素，$L_4=\{S_5\}$。

综合得分层结果：

$$\pi_L(S)=[L_1,L_2,L_3,L_4]=[\{S_6,S_8,S_9\},\{S_1,S_3,S_7\},\{S_2,S_4\},\{S_5\}]$$

4. 建立系统的层次结构

在完成级划分后，为了进一步关注在每一级中各元素的关系，我们给出了强连通表，见表 2-4。

表 2-4　元素关系强连通表

	S_6	S_8	S_9	S_1	S_3	S_7	S_2	S_4	S_5
S_6	1	1	1	0	0	0	0	0	0
S_8	1	1	1	0	0	0	0	0	0
S_9	1	1	1	0	0	0	0	0	0
S_1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
S_3	1	1	1	0	1	0	0	0	0
S_7	1	1	1	0	0	1	0	0	0
S_2	1	1	1	0	1	0	1	0	0
S_4	1	1	1	0	0	1	0	1	0
S_5	1	1	1	0	1	1	1	1	1

依据表 2-4 即可以绘制出系统的层次结构，见图 2-16(a)。

由此得出某专业教学质量制约因素系统解释结构(图 2-16(b))。

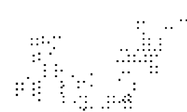
5. 某专业制约因素系统结构说明

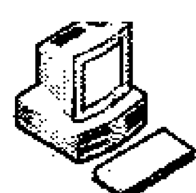
由建立的某专业教学质量制约因素系统解释结构模型(图 2-16)得出四个层次级别因素。

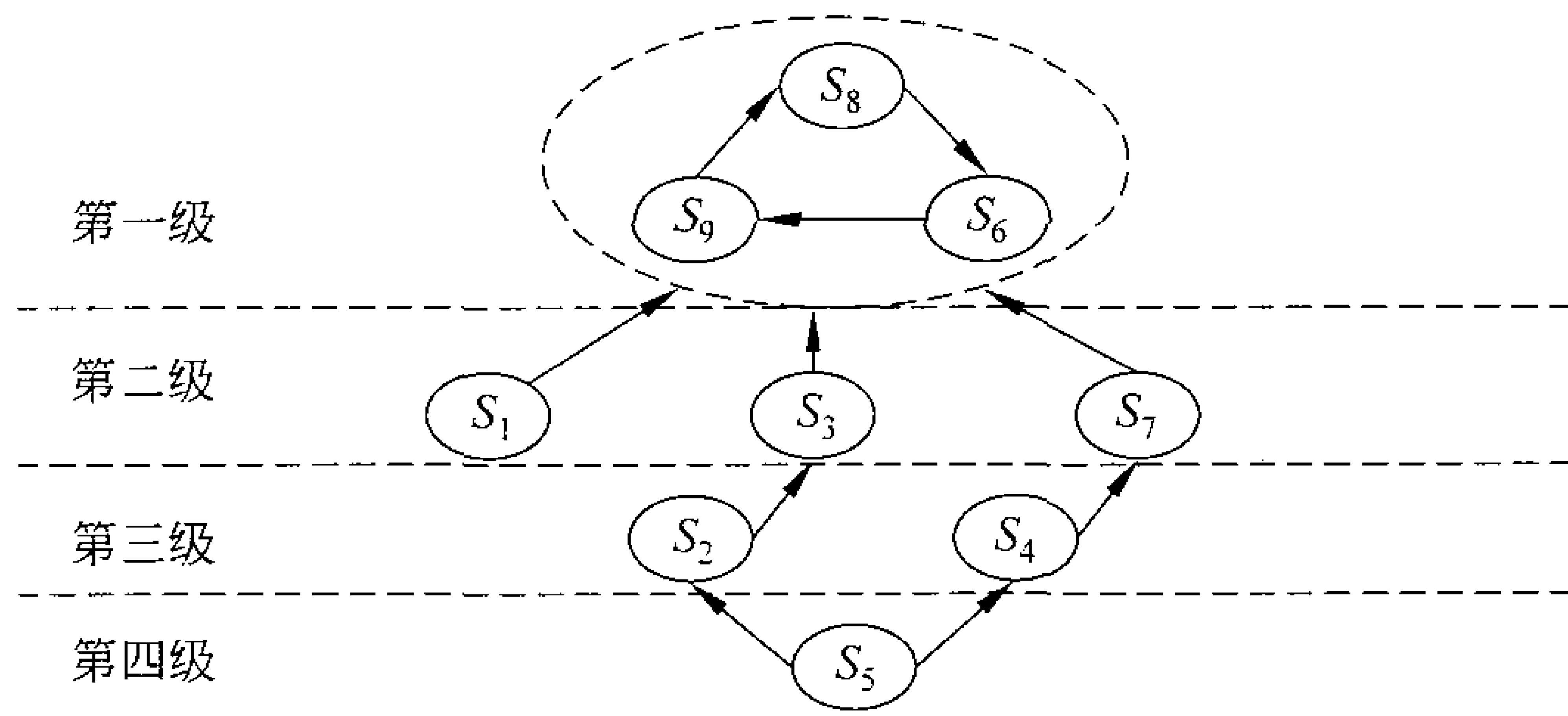
(1) 教学质量不高，学生专业思想认识不够，学生学习积极性不高。

(2) 教材、专业资源缺乏，专业基础课脱节，社会实践机会少。

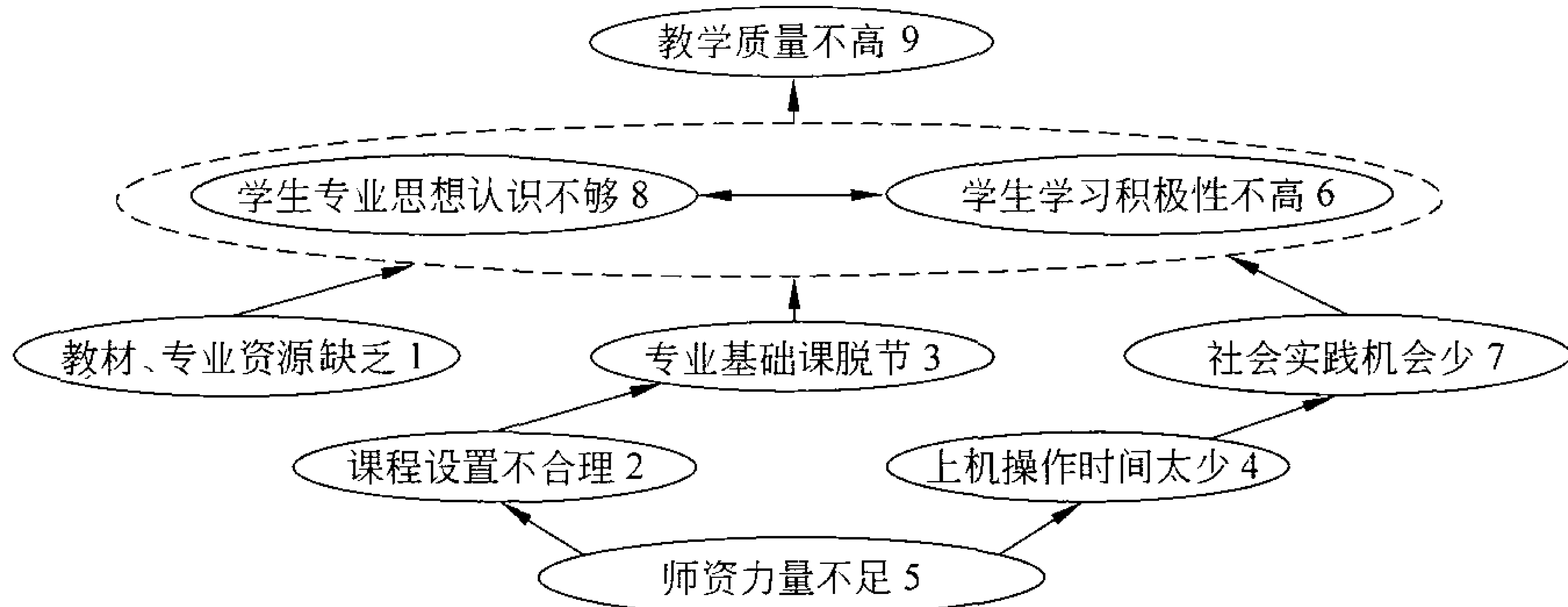
(3) 课程设置不合理，上机操作时间太少。







(a) 某专业教学质量制约因素系统层次结构图



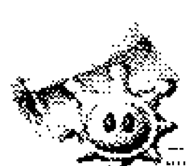
(b) 某专业教学质量制约因素系统解释结构图

图 2-16

(4) 师资力量不足。

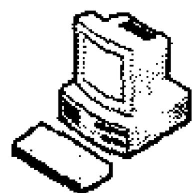
根据图 2-16,我们能把制约教学质量的瓶颈问题归结于"师资力量不足"与"教材、专业资源缺乏"两点。因此,提高教学质量的关键一是"人才";二是"教学资源"。

注意:例 2-2 给出了制约某专业教学质量的 9 个因素,这些因素正是影响教学质量提高的"问题",因此元素集由一个个"问题"因素构成。应用 ISM 方法给出了这些"问题"要素之间的关系和系统结构分布(图 2-16),这就是我们在第 1 章中提到的制约教学质量提高的系统性问题。



本章小结

系统在我们的日常生活中无处不在。在自然界和人类社会中,可以说任何事物都是以系统的形式存在的,大到宇宙、银河系、太阳系、地球等天体系统,小到高能物理学研究的原子核结构;远到如战国都江堰水利工程系统,近到越来越主宰人们生活、工作的计算



机系统等，这些所要研究的对象都可以被看成一个系统。

目前，国内外学者对系统的定义还没有统一的说法。系统这个概念其含义十分丰富。与要素相对应，意味着总体和局部；与孤立相对应，意味着关系与联系；与混乱相对应，意味着秩序与规律。研究系统，意味着从事物的总体与全局上、从要素的联系与结合上去研究事物的运动与发展，找出其固有的规律，建立正常的秩序，实现整个系统的优化。这正是系统工程的宗旨。

大千世界有各种各样的系统，每种系统的具体结构都不一样。大系统的结构往往比较复杂，而小系统则相对简单。从一般意义上说，可以通过框图和集合两种方法对系统进行描述。

结构模型是图形模型中最重要的刻画大规模复杂系统结构特征的系统结构分析方法。建立系统结构模型的方法包括只着眼于系统组成要素间有无关联的 ISM 方法、用具体数值表示关联度的 FSM 方法、DEMATEL 方法等。



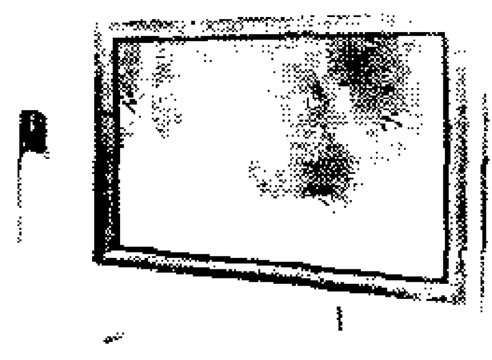
思考题

1. 对“问题”进行阐述，谈谈你对“问题”的看法，举一个“系统性问题”的例子说明你对“系统性问题”是如何理解的。

2. “大学城”是一个系统，谈谈“大学城”的功能。

3. 谈谈“教学质量系统”的五要性。

4. 给出某个系统性问题，用 ISM 方法构造系统性问题的结构，找出系统的制约瓶颈要素。



第3章 系统工程方法论

本章关键词

硬系统方法论(hard system methodology)　软系统方法论(soft system methodology)

本章要点

霍尔(Hall)硬系统方法论、切克兰德(Checkland)软系统方法论、综合集成方法论和物理—事理—人理系统方法论,它们各自的特点及思维方式。

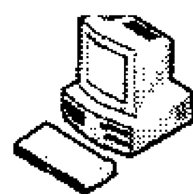
霍尔的三维结构体系;通过应用案例理解系统工程在霍尔三维结构体系中逻辑维的6个逻辑步骤。

通过系统工程方法论的学习,使学生面对复杂的系统问题时,会以系统的观点去认识问题,并能够在系统科学思想的指导下运用系统工程方法处理,这是达到系统的最优化、获得系统的最优解的基础。

随着系统化管理的日益渗透,解决系统性问题需要的系统方法和技术日益重要,系统工程的原理和方法也在许多研究领域起着越来越重要的作用。

任何一门科学或技术都有自己相应的一系列方法(method),而方法论(methodology)就是最具特色的根本方法,反映了系统工程研究和解决系统性问题的一般规律,探索一般途径。因此运用系统工程方法把设想变为实体的一般过程与步骤称为系统工程方法论。

系统工程一直非常重视方法论的研究和探索。很多学者都对系统工程解决问题、处理问题的方法进行过大量的研究,其中最具代表性的且影响较大的是1968年由美国贝尔电话公司、IEEE高级会员霍尔(A. D. Hall)提出的系统工程方法论,即系统工程三维结构体系,简称为霍尔方法论。20世纪70年代中期,英国学者切克兰德(P. B. Checkland)经过大量的系统实践,提出了一种软系统方法论。切克兰德软系统方法论旨在提供一套系统方法,其核心概念是人类活动系统。在硬、软系统方法论的基础上,人们研究探索硬与软方法兼容、自然科学和人文社会科学结合形成的综合方法论。



3.1 霍尔(Hall)硬系统方法论

3.1.1 Hall 方法论三维结构体系

Hall 方法论是由美国贝尔电话公司的工程师霍尔于 1968 年提出来的。他认为,任何工程在时间上、逻辑上和知识上都有一个合理的序列,时间维、逻辑维和知识维组成了科学活动工程结构的三维形态。Hall 方法论三维结构见图 3-1。该方法一直以来被许多系统工程工作者应用在系统工程实践活动中。

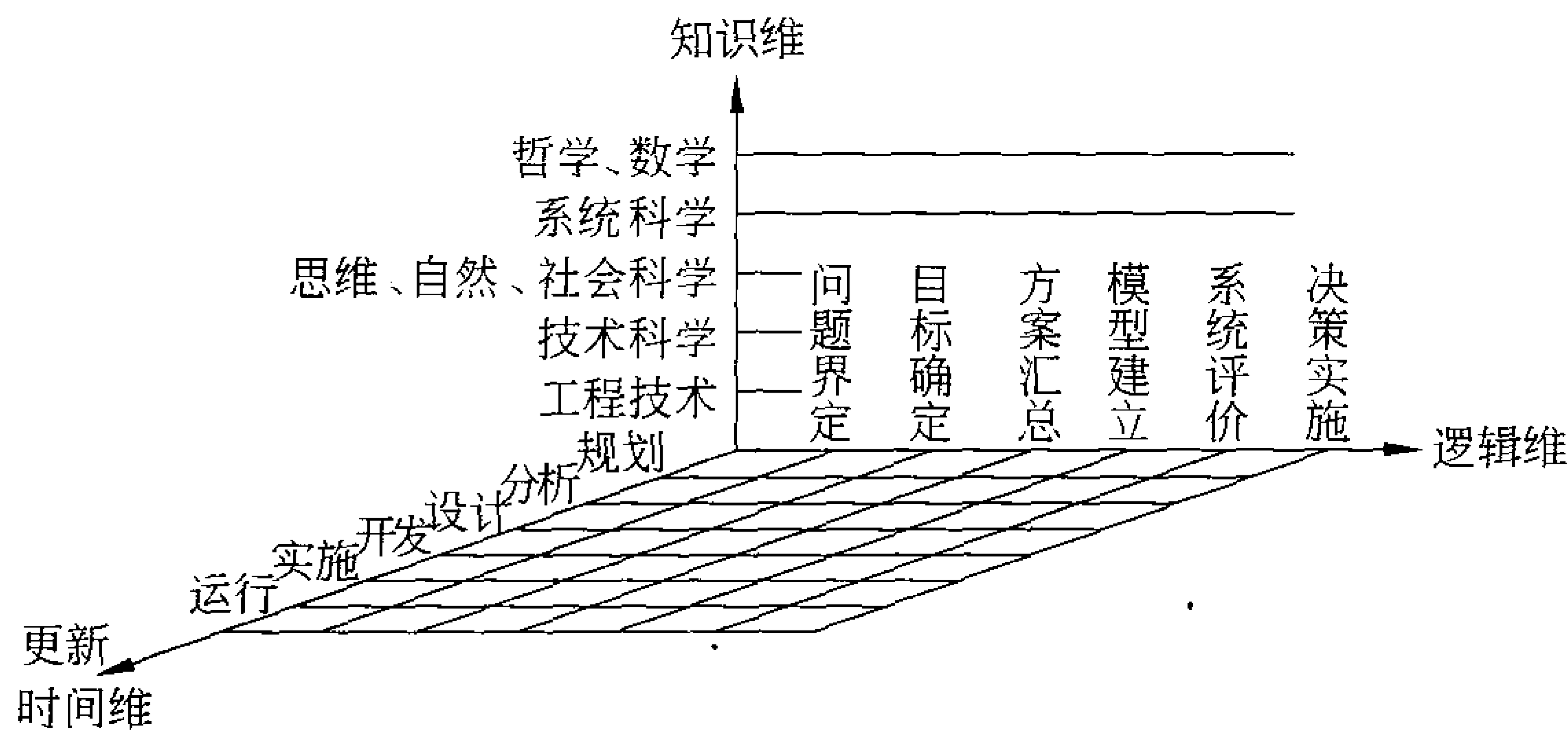


图 3-1　霍尔方法论三维结构

1. 时间维

时间维是系统工程活动按时间的工作步骤,依次分为规划、分析、设计、开发、实施、运行和更新 7 个时间阶段。

(1) 规划阶段:制定系统工程活动的规划和战略阶段。这个阶段要进行大量的调查研究,明确系统目标,提出设计思想,制定战略规划。

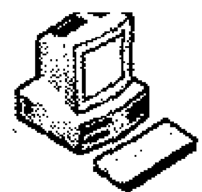
(2) 分析阶段:提出系统工程活动的计划和方案阶段。这个阶段是对规划阶段制定的战略规划综合分析社会经济、管理技术等方面的可行性,提出可行的计划方案。

(3) 设计阶段:设计具体的计划方案阶段。这个阶段是对分析阶段提出的可行方案,合理组织人、财、物进行具体的实施设计,研制实施方案并制定生产计划。

(4) 开发阶段:开发系统的各个实体部分阶段。这个阶段是根据设计的生产计划组织实施方案,提出组装系统的计划。

(5) 实施阶段:组装系统的实体部分形成系统阶段。这个阶段对生产或研制开发出的系统各个实体部分进行安装和调试,并提出系统的运行计划。

(6) 运行阶段:运行系统阶段。这个阶段是对系统进行安装运行、服务监控,使系统按照预期目标运行。



(7) 更新阶段：维护系统阶段。这个阶段是保证系统有效工作阶段，包括改造原系统或者更新系统。

例如，产品的生产规划流程，按时间顺序可以分为7个环节考虑：市场调研、市场细分、产品设计、原材料购进、配给生产、质量检查并成品入库、销售并接受反馈。软件生存周期遵循时间维规律，见图3-2。游戏软件开发经历市场调研制定规划(策划书)、软件开发计划书设计、人物与场景等模块开发(研制)、各模块制作(生产)、组装与调试、运行、软件升级或更新等环节。

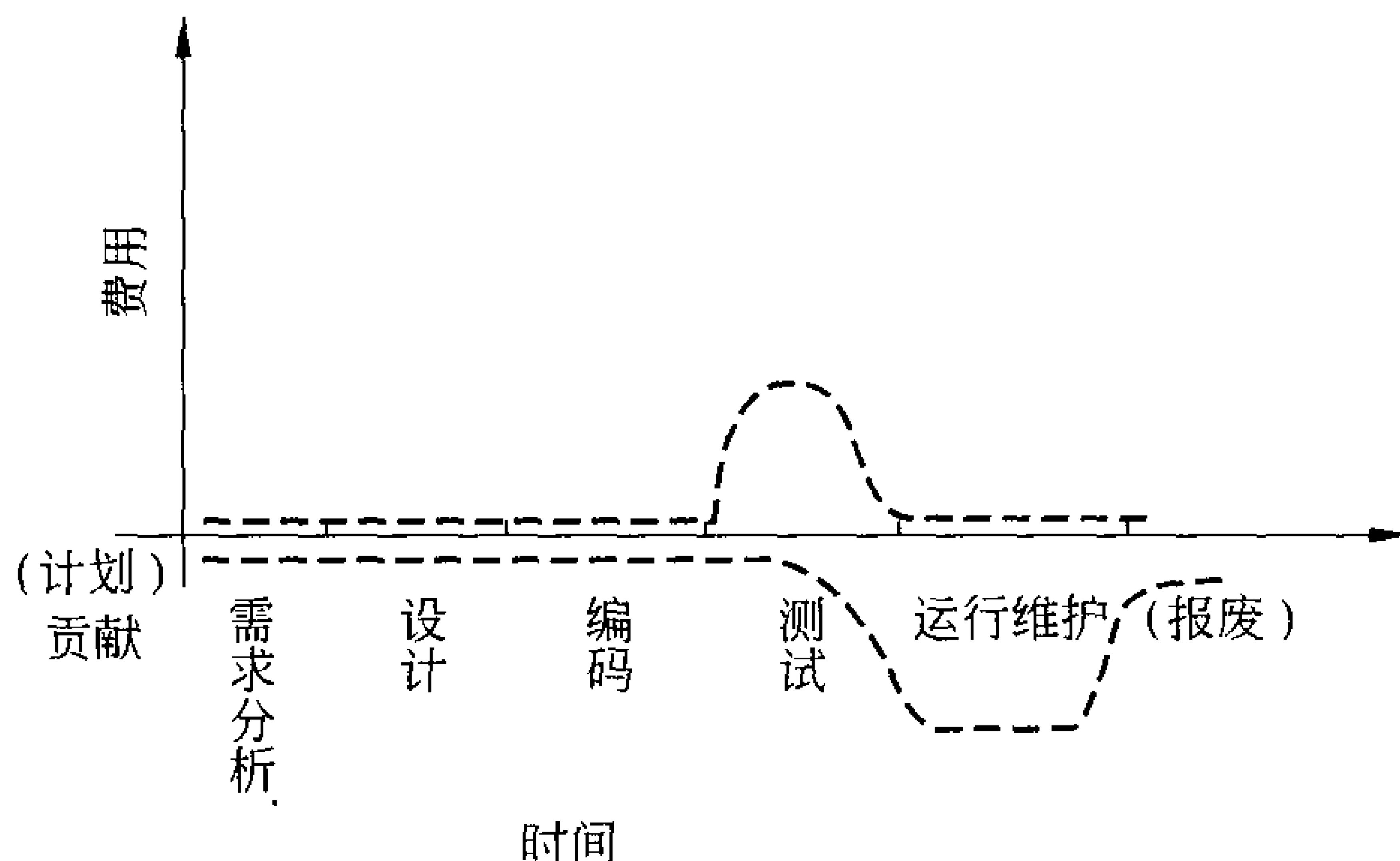


图3-2　软件生存周期

2. 知识维

知识维是系统工程完成工作需要的各种理论知识与专业技术知识。

在开展系统工程活动时，由于不同阶段和不同步骤具有不同的工作内容，需要用到的各种学科内容和专业知识也会有所不同。按照“系统思想—系统科学—技术科学—工程技术”的分类，其知识领域可以用5个等级来表述，如图3-3所示。

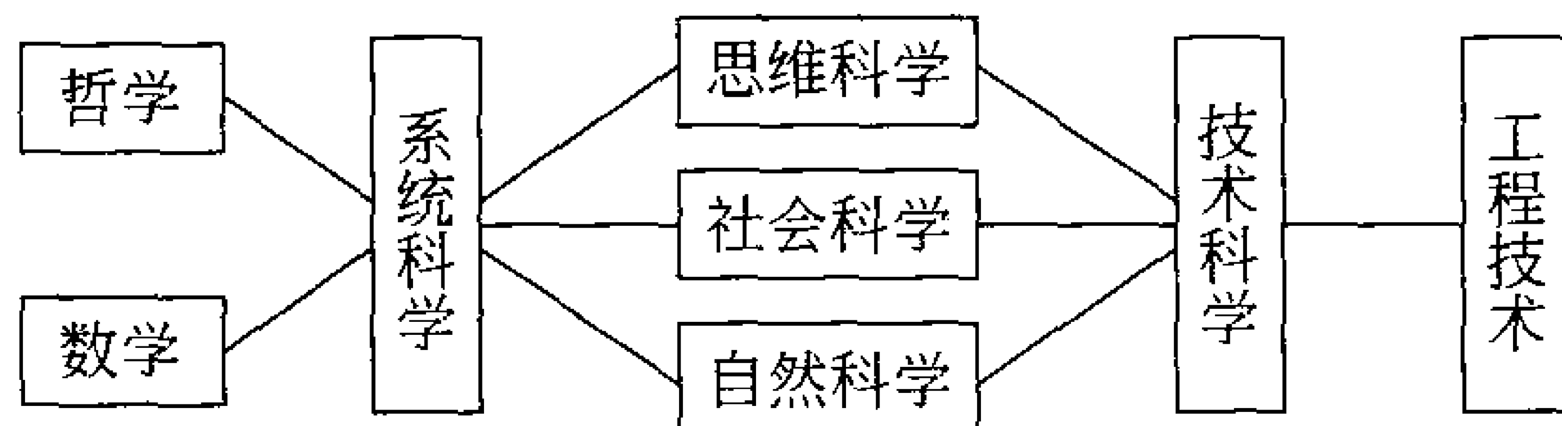
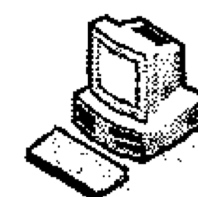


图3-3　方法论的专业知识领域

3. 逻辑维

逻辑维表示在系统工程活动的每一阶段工作中使用系统工程方法思考和解决系统性问题应遵循的逻辑顺序。包括问题界定、目标确定、方案汇总、模型建立、系统评价与决策、实施这6个逻辑步骤。



下面通过“产品生产过程”的例子，从时间维、专业维和逻辑维三维角度用 Hall 方法论分析，如图 3-4 所示。

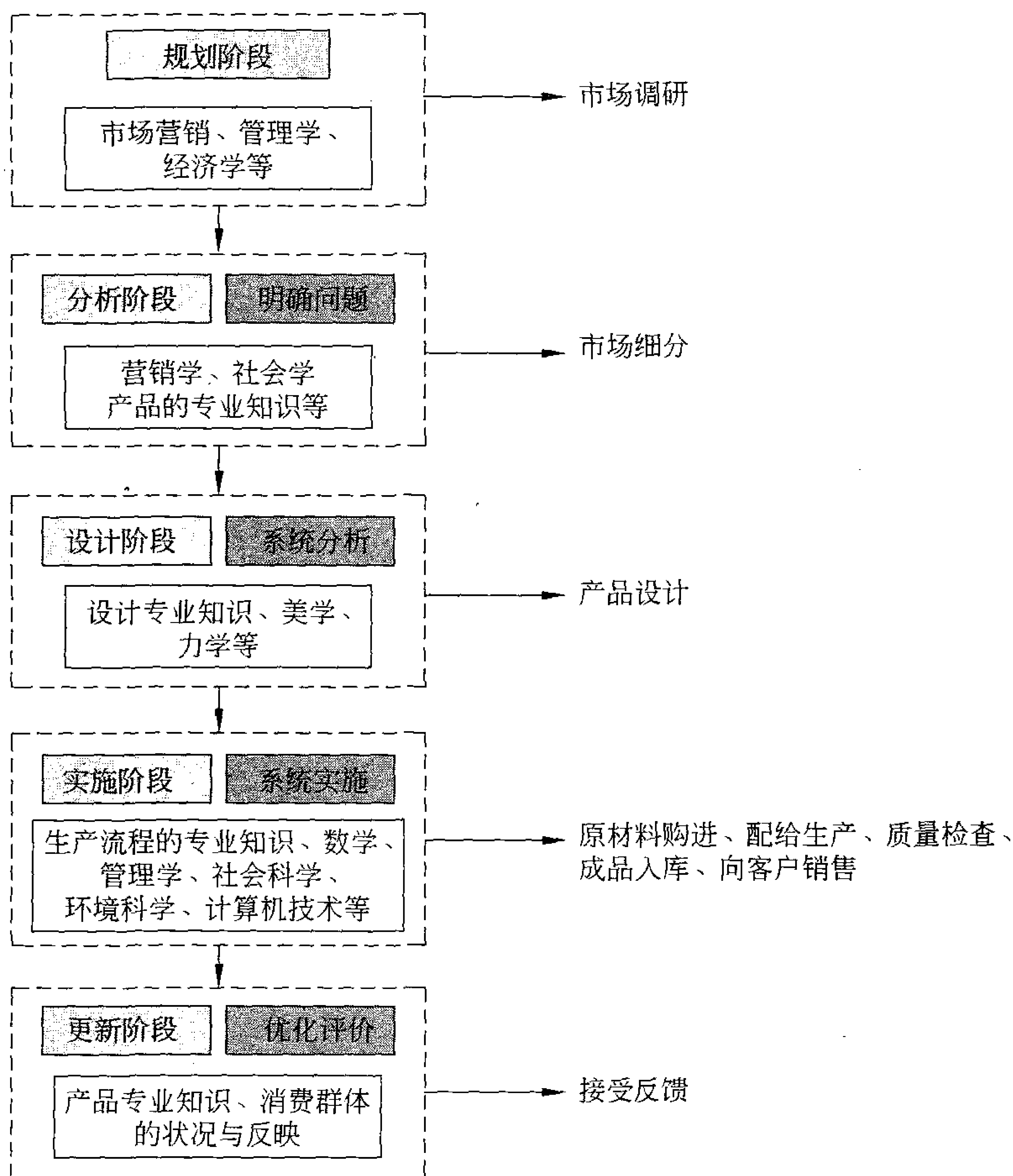
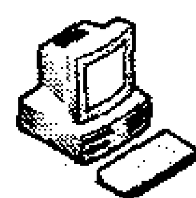


图 3-4　Hall 方法论解释“产品生产过程”

注意：霍尔的三维结构体系在应用时要注意以下两点。

(1) 必须把三维统一起来考虑。如果把时间维、逻辑维、知识维分别记为 X,Y,Z，那么三维坐标(X,Y,Z)就表明了系统工程的过程与步骤的特征：在什么阶段，进行什么步骤，用到什么等级专业知识。例如(X_1,Y_3,Z_2)表示在系统规划阶段，方案汇总步骤，涉及技术科学知识。

(2) Hall 的三维坐标(X,Y,Z)是运动、发展、变化的，即每个时间阶段(时间维)、各个逻辑步骤(逻辑维)涉及各种等级专业知识(知识维)。



3.1.2 Hall 方法论的特点

从 Hall 方法论的三维结构中，可以得出该方法论具有如下特点。

(1) 综合性：任何系统工程活动都综合了时间阶段、逻辑步骤和相应的知识结构。霍尔方法论重视的是整体能够达到最优效果，而非部分最优。例如"产品的生产过程"。在图 3-4 中，虚线框表示一个具体的活动，向右箭头指向的名称即对应活动的名字，每个虚线框里面都反映了该活动处在时间维和逻辑维上的位置。其中背景为浅灰色的方框表示时间维，背景为深灰色的表示逻辑维。空白框里面的内容是所需要的知识领域的举例。这是反映企业生产过程的例子。可见，在分析过程时，是将这三个维度融合在一起，进行全局考虑的。

(2) 联系性：系统工程的各项活动并不是孤立的，它们之间是相互联系、相互影响的有机关系。

(3) 反复性：Hall 方法论的要点是，把设想变为现实的步骤与过程是按照三维体系分布形式进行思考的。这个过程在不断地反馈、改进而重复，这种重复不是简单地重复，而是螺旋式上升、波浪式前进的过程，是发展的、深化的。

(4) 收敛性：系统工程活动的最终结果一定要满足目标函数，因此系统工程的各项活动始终朝着目标的方向运动和发展。

(5) 功能性：Hall 方法论的每一步都具有相应的职能，具体包括计划、组织、控制、调节和决策等。

Hall 方法论在研制以"硬系统"为目的的自然科学、工程技术等"硬科学"领域时具有非常好的适用性，所以又称其为硬系统方法论。硬系统方法论的思维过程可以用图 3-5 表示。

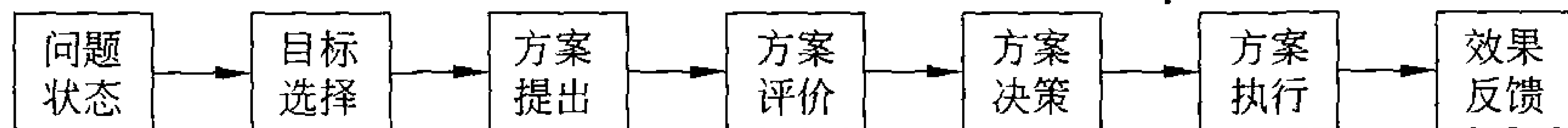
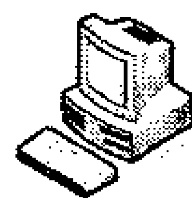


图 3-5 硬系统方法论思维过程

从 20 世纪 70 年代开始，系统工程已逐步用于研究社会经济系统的发展问题，但因所涉及的社会因素相当复杂，有很多因素很难进行定量分析，所以硬系统方法论的局限性也越发明显。主要表现在以下 3 个方面。

(1) 硬系统方法论认为系统的目标确定是明确的，却没有为系统目标的定义提供有效的方法。而对于大多数系统管理者来说，目标定义本身就是需要解决的首要问题。

(2) 硬系统方法论没有考虑系统中人的主观因素，把系统中人与其他物质因素等同起来，忽视了对人的主观认识(人有时恰恰对系统起主观决定作用)，认为人为控制因素对系统发展的影响来自系统之外。



(3) 硬系统方法论对于解决“系统性问题”非常有效。但是，切克兰德指出：对于社会经济这样的系统，有时甚至连“问题”都很难确定，仅仅只是一堆“议题(issues)”。首先要从一堆“议题”中找出要解决的“问题”，这些问题含有大量的社会、政治以及人为因素，称为非系统性问题，这时用硬系统方法论难以解决。

为了适应发展的需要，从70年代中期开始，英国学者切克兰德经过大量系统实践，提出了一种软系统方法论。

3.2 软系统方法论

英国学者切克兰德(Checkland)于20世纪70年代提出了一种称之为软系统方法论的理论。软系统方法论认为社会经济系统是人的主观构造的产物，对社会经济系统的认识离不开对人的主观意识的了解。正如切克兰德所指出的，对于社会经济等系统所存在的大量的非系统性问题，可按照软系统方法论的步骤加以研究和解决。

切克兰德软系统方法论旨在提供一套系统方法，其核心概念是人类活动系统。由于认识能力尤其是礼仪的不同，人类活动系统包括结构化问题(系统性问题)和非结构化问题，问题难以形成统一的“公众的知识”，因此难以用硬系统方法论予以解决。软系统方法论的核心不是通过模型求解最优化，而是比较或者是学习，即是从模型和现状的比较中学习改善现状的途径。比较意味着组织系统内各成员间开展自由的、开放的讨论和辩论，达成共识，而不拘泥于定量分析，这就能更好地反映人的因素和社会经济系统的特点，使得观念在讨论中得到充分表现，在此基础上达成对系统进行改进的方案。

切克兰德的软系统方法论的思路和步骤如图3-6所示。

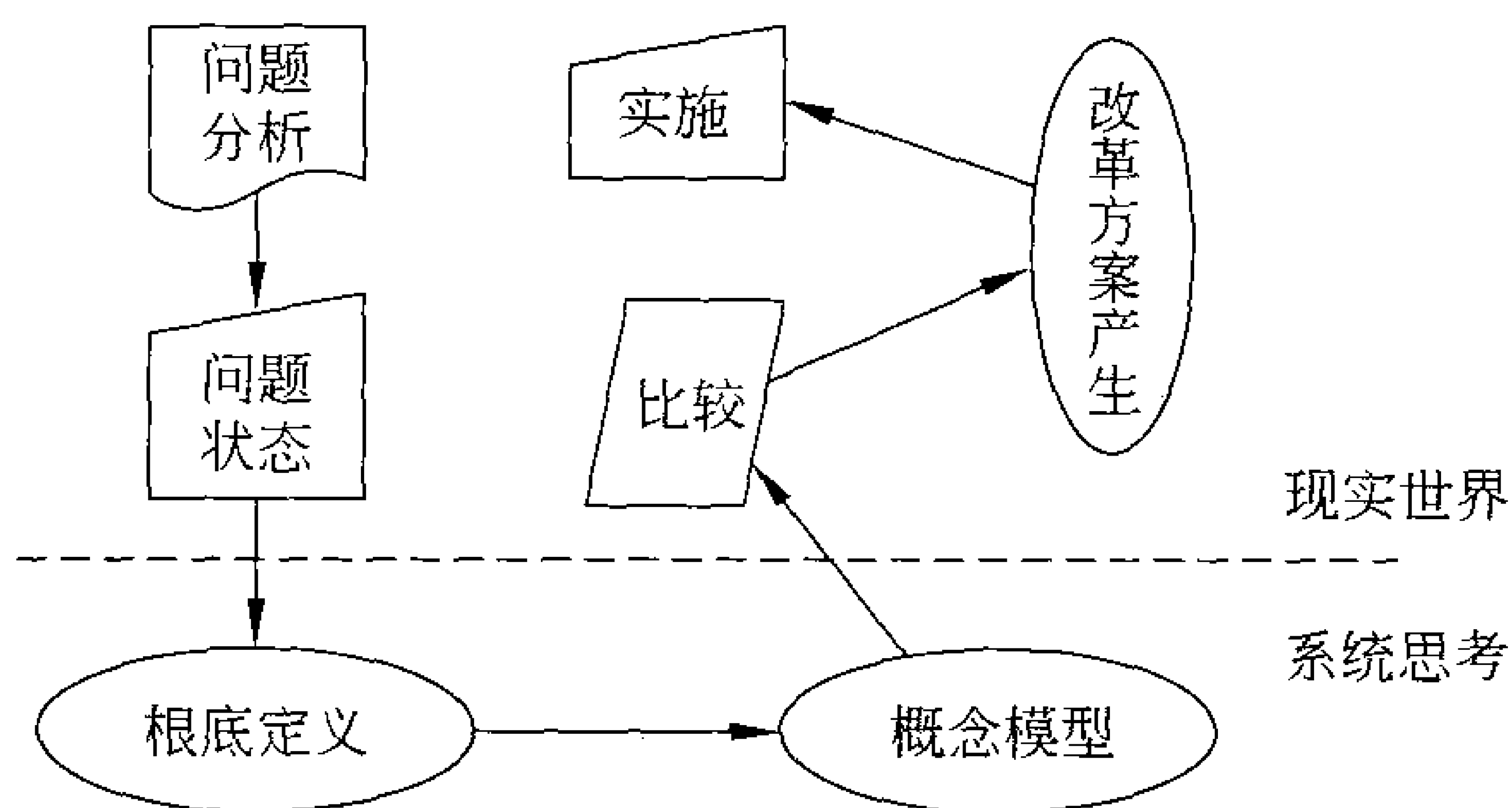
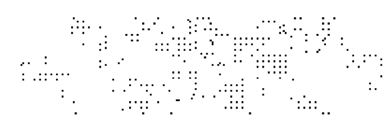
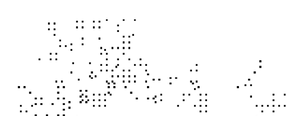
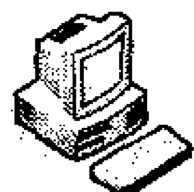


图3-6　软系统方法论思维过程

实践证明，软系统方法论有助于决策理论的研究与应用。因为无论是宏观战略决策还是企业经营管理决策，绝大多数决策需要依靠人的判断来决策。特别是高层的、战略性的和非程序化的决策，往往呈现非结构化的特点，更需要依靠人的智慧、知识和经验来帮







助制定。软系统方法论可以为决策者充分发挥其知识、智慧和经验提供一个途径，可望使决策更为有效和切合实际。

遗憾的是，切克兰德所说的步骤太“软”，很难具体实施。

例如，有作者基于软系统方法论对林业生态工程效益进行评价。这是因为森林是一个开放的复杂巨系统。人们对森林不同层次、系统之间的结构与每个系统内部的子结构以及相互作用机制，至今仍不很清楚，再加上人们追求的目的与价值观差异较大，对森林甚至环境的要求与行为也就有重大差异。人类对森林的不同行为，给环境、给人类社会经济系统带来的不同后果也说法不一。对系统结构与产生后果的机理更是存在很多意见分歧，即使对人类社会实施林业生态工程的目的有大致相同的看法，但由具体可观测指标体系所界定的目标尚无共识。正因为有这些特点，林业生态工程的评价与工程实施后效益的评价有着本质的差异，后者是典型的工程系统问题，有详细的说明书描述，有确切的需要，有明确的目标与达到目标的手段，因此可以应用硬系统方法论加以描述和评价。而前者适合应用软系统方法论给予评价。

3.3 H-Ch 综合系统方法论概述

在硬、软系统方法论的基础上，研究、探索硬与软方法的兼容，自然科学和人文社会科学结合的综合方法论是方法论研究的重要方向。H-Ch 综合方法论应运而生。

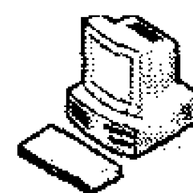
Hall 方法论的逻辑维具有普适性，其“硬”主要体现在时间维，因此只要在逻辑维之前加一个“讨论议题”步骤，对于社会经济系统，通过讨论议题，达成共识（或者形成决议），形成系统性问题。接下来对形成的系统性问题沿用霍尔的硬系统方法论予以解决，这就是 H-Ch 综合方法论的内容。

3.4 几种方法论的比较

表 3-1 列出了硬系统方法论和软系统方法论以及 H-Ch 综合方法论的特点。

表 3-1 硬、软系统方法论，H-Ch 综合方法论的特点

方　法	主要特点
硬系统方法论	（1）抽象、简化对象现实状态 （2）建立模型进行方案评价分析 （3）强调数学模型，追求精确性，注重最优化和效率 （4）不注重人的因素



续表

方　法	主要特点
软系统方法论	(1) 问题处理过程分为现实世界行为和思考行为 (2) 重共识、沟通，适用于软问题 (3) 引入概念模型，没有一定算法，可操作性差，主观性强 (4) 注重人的因素
H-Ch 综合方法论	(1) 兼容硬、软系统方法优点，弥补各自不足 (2) 知识综合集成 (3) 适用于硬问题、软问题和硬软交叉的问题

3.5 系统工程方法论的进一步发展

到目前为止，关于系统工程方法论的研究，Hall 的三维结构体系影响最大、应用最广。但是，Hall 的三维结构体系在应用上不能显著地反映地域(环境)等空间影响，也不能适应世界经济技术国际化、社会信息化的快速发展。然而，现代社会环境关系模糊复杂，环境对系统生存、发展至关重要。环境适应性作为系统的特性意味着任何一个系统都存在于一定的物质环境之中，系统与外界环境之间必然产生物质、能量和信息的交换，外界环境的变化必然会引起系统内部的变化。因此，有专家提出了系统工程方法论的四维体系结构，如图 3-7 所示。

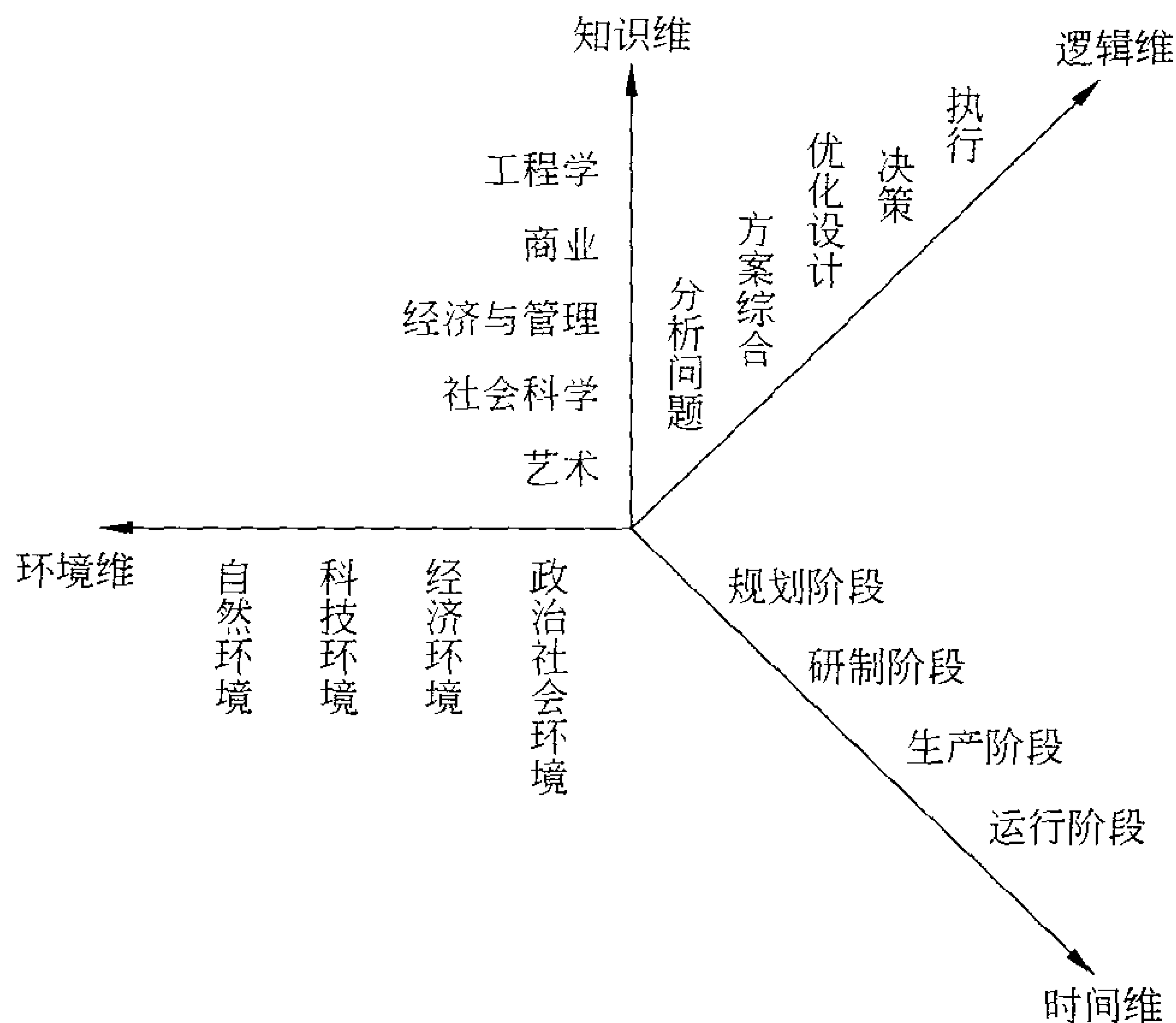
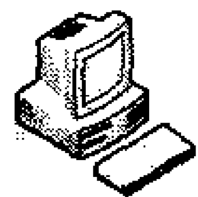


图 3-7　系统工程方法论的四维体系结构



四维结构体系增加了环境维，强调环境分析在系统工程方法论中的重要性，以适应环境多变的系统工程问题，并且提出知识维的法律政治状况、管理技术水平的高低等都与空间环境有关。

其实，方法论本身就是系统工程。正如系统工程专家孙东川教授在钱学森系统科学思想报告会上就"系统工程方法论与方法论系统工程"谈到的：系统工程已经发展为一种普遍使用的方法论，即用系统的观点来考虑问题(尤其是复杂系统和复杂大系统的问题)，用工程的方法来研究和求解问题(定性与定量相结合，从定性到定量的综合集成)，不妨称之为"方法论系统工程"，即"作为方法论运用的系统工程"。

注意：本教材以 Hall 的硬系统方法论展开介绍系统工程活动采用的方法论过程。

3.6 HALL 方法论的逻辑步骤

人们在运用 Hall 方法论解决系统性问题的时候作了许多的演绎，内容很丰富，尤其是有关它的逻辑维。下面就逻辑维的 6 个步骤：问题界定、目标确定、模型汇总、模型建立、系统评价与决策、系统实施分别进行介绍。

3.6.1 问题的界定

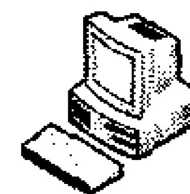
问题的界定往往需要开展市场调查，收集有关资料与数据，了解需要解决的问题的本质，弄清问题的历史、现状和发展趋势。特别是要弄清楚对系统性问题产生影响的环境，因为环境约束系统、环境改变系统，系统必须在环境中生存，系统的优劣需要在环境中进行评价。问题的界定包括系统的边界确定和系统的环境分析。

1. 系统的边界确定

边界分割系统与环境，边界确定又称为系统识别。对于封闭系统，其边界是确定的。但是对于一个开放系统，例如社会、经济系统，其边界往往不是明晰的。那么如何确定社会、经济这些开放系统的边界呢？为了回答这个问题，来看下面的这个例子。

例 3-1 企业生产经营系统

对该系统有作用的要素包括劳动力、资金、厂房、设备、原材料、技术、管理水平、产品、电子商务、品牌、用户、竞争者或合作者、政策、信息、社会影响、企业形象等。这些要素中有一些可以归为系统要素，另一些则可以归为环境要素，分析这些是对系统进行研究的基本且非常重要的一步。如果我们的问题是如何提高"投入—产出率"，则围绕"投入—产出率"确定系统的要素有劳动力、资金、厂房、设备、原材料、技术、管理水平、产品等，而用户、竞争者或合作者、信息、政策等可以考虑为系统的环境要素；如果我们的问题是如何提高"企业对外竞争力"，则围绕"企业对外竞争力"确定系统的要素，可以考虑产品、品牌、技



术、企业形象等，而用户、竞争者或合作者、电子商务、社会影响等可视为系统的环境要素。

从这个例子可以看到，一个开放的系统由构成系统的要素和系统的环境要素分割得到系统的边界。而系统要素和环境要素的确定要视系统性问题如何而后才能具体确定。

综上所述，系统的边界确定，可以依据系统性问题划入系统要素，根据系统要素确定系统的边界。

注意：(1) 系统的边界确定既与所研究的系统性问题有关，还与研究问题的目的有关。

(2) 研究的系统性问题要求越高，归入系统的要素越多，问题分析越复杂。

(3) 在第 2 章中我们已经给出确定系统的要素时应遵循的一般原则，在此再次重申：

① 对研究问题具有举足轻重作用的要素。

② 能由系统的设计和系统的运营而得到控制和调节的要素。

③ 能对系统的行为产生直接影响的要素。

2. 系统的环境分析

环境是指存在于系统外的物质、能量、信息并对系统有影响的相关因素的总称。

系统与环境的关系可以用图 3-8 表示，图中 I(Input)表示系统的输入，O(Output) 表示系统的输出。

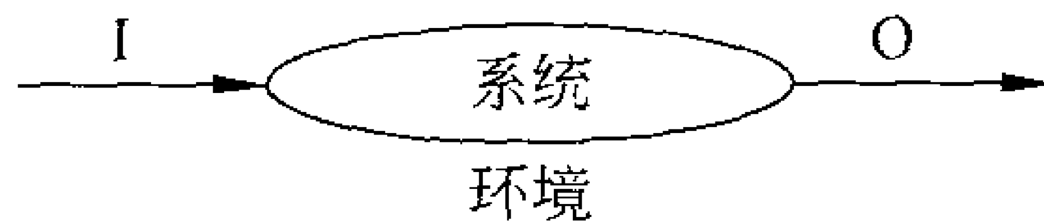


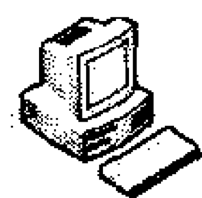
图 3-8　系统与环境的关系

系统的环境分析包括：①物理技术环境分析，主要弄清正在允许的系统的物理技术状况和有关知识；②经济管理环境分析，主要弄清新建系统所处的社会经济运行环境；③社会人际环境分析，主要弄清人和某些社会集团的相关关系，所研究的系统要纳入到社会整个大系统和个人行为原系统中。除了上面的三个主要环境因素以外，还要考虑政策环境、资源环境等环境因素，要因时、因地、因人加以分析。

例如上海市新港建设初期选址问题。影响选址的环境因素有政治、经济、地理、技术、交通、城市设施等。

(1) 物理技术环境分析包括：气候条件(风级、浪高)；航道(现状、稳定性、增深的可能性)；暗滩河势(暗滩、河势稳定性、保存难易度)；回淤(淤积量、清淤条件)；地质条件(软土层厚度)；主要港口建筑物(围堰、码头、防波堤的结构及施工条件)；规模(泊位数、船型适应性)；运行与维修(航行、装卸、运行、维修的方便与安全)等因素的分析。

(2) 经济管理环境分析包括：投资额；建设周期；投资回收期；每年可创造的利润和税金；对农业、渔业、副业、服务业、航运业、地方工业、上海市、长江流域、全国经济、国际贸易的收益影响等因素的分析。



(3) 社会人际环境分析包括：对周围城市及地区的规划与发展的影响；与全国交通网络的联系及与“老港口”的关系；与国内重大项目的关系(南水北调、三峡高坝)；与军港建设关系；对社会治安、国家安全的影响等因素的分析。

(4) 政策环境分析包括：党和国家的有关方针政策；国民经济发展的要求；改革开放的方针政策等环境因素分析。

(5) 资源环境分析包括：符合国家能源政策的程度；对上海能源的影响；需投入的能源(煤、油等)；电力供应能力；需征用的土地；征用土地的可能性；淡水供应能力；建筑材料供应；项目的施工力量；副食品供应等。

(6) 环境保护分析包括：废水排放；废气排放；对生态影响；对风景区名胜古迹的影响等。

3.6.2 目标确定

1. 目标及其重要性

所谓目标，是指系统希望达到的目的或结果。例如学校希望培养优秀(德、智、体、美、劳全面发展)的学生；企业希望成为国家百强；大学城建设希望实现优质资源共享、优势互补等。

科学地确定目标具有十分重要的意义，关系到整个系统工程的方向、范围、投资、周期、人员分配等决策。

2. 目标的分类法

目标可以按两种标准进行分类。

(1) 按照来源分类，可以分为与外部环境有关的目标，如企业的生产目标是提供社会必需品，市场目标是根据市场需求，发展目标是根据 WTO 要求提高企业对外竞争力；与内部环境有关的目标，如成本目标、效益目标、效用目标、质量目标、根据扩大再生产能力的发展目标等。

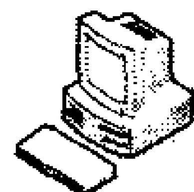
(2) 按照设计要求分类，可以分为技术目标，如新型小轿车的主要技术性能(安全系数、最大行车里程、速度等)目标；经济目标，如 GDP、GNP、劳动生产率、投资回报率、投资回收期；社会目标，如扩大就业率、社会治安稳定、完善养老保险制度等；环境目标，如防止污染、减少公害、加强绿化等。

3. 确定目标的原则

确定目标应遵循如下原则。

(1) 长远性原则：选择有重大影响的事项为目标，不能急功近利。例如经济事项中的长期发展目标。

(2) 总体性原则：注重总体效果，不能偏重其一方局部利益。例如“公交车最佳调



度”问题，设计目标时应考虑“公交系统与乘客的双赢策略”目标。

（3）可行性原则：可以达到或经过努力可以达到的目标，即要考虑目标的约束性。

（4）单义性原则：目标不能歧异，即不能让目标有几种不同的理解。

（5）具体性原则：具体是指目标内涵要清楚。例如“好”的产品内涵明确为技术（新）、销路（好）、利润（高）、领域（领先）。“高质量”的教学指教学内容（丰富）、教学态度（端正）、教学科学性（强）、辅助教学手段（先进）、教学效果（好）等。“满意”的计算机内涵包括价格（低）、性能（强）、功能（多）、维护（易）等。“好”的区域形象内涵指经济形象（强）、发展形象（佳）、群体形象（好）、外观形象（美）。如果高校的目标只是“培养人才”，则培养目标不明确。因为学校对培养人才有不同的定位，可以是应用型人才、研究型人才，或技术型人才等。它们的出发重点不同、要求不同，实施措施不同，考核内容也不同。

（6）标准性原则：达到目标的程度有明确的衡量标准，即目标的指标化。例如反映计算机性能可以用“内存容量”、“运算速度”、“字长”等指标的值来衡量。

（7）一致性原则：多个目标应注意避免冲突。

（8）有序性原则：指多个目标按其轻重缓急排序，根据需要按优先原则实现。如设计新型汽车，其目标为“质量（安全系数、行车里程等）”、“成本”、“外观”等，可以按“质量”、“成本”、“外观”的目标顺序进行设计，也可以按“质量”、“外观”、“成本”的目标顺序进行设计。

4. 目标的指标表示及指标体系

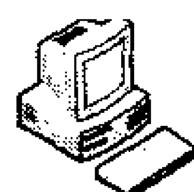
系统的目标确定可以依据系统指标进行设计。所谓指标，是衡量目标达到程度的评价标准。例如成本、利润、人口、在校学生数等都是指标。

可以细分指标为统计指标和功效系数指标。统计指标是指，可以用具体公式或具体数字赋予指标值，这样的指标称为统计指标。例如产品合格率（＝合格品数量/全部产品数量）就是统计指标。成本、利润、人口、在校学生数等都是统计指标。在“形象评价系统”中，反映经济实力形象的有关指标（如GDP、国民收入等）、反映经济发展形象的有关指标（如经济发展速度）、反映科技发展形象的有关指标（如科技人才比例）、反映社会发展形象的有关指标（如水、电、气普及率等）都是统计指标。而那些不可以用具体公式或具体数字赋予值的指标称为功效系数指标。例如新型轿车的“舒适性”指标；形象评价系统的可持续发展能力、发展协调性、发展活力等指标；教学质量系统的教学态度、教学水平等指标都可以看成是功效系数指标。

系统性问题往往具有多目标，应该建立明确的系统目标（又称为指标体系）来作为实现目标的系统方案的评价标准。关于指标体系概念将在第5章中介绍。

注意：指标应用于系统评价工作时具有以下两个难度。

（1）功效系数指标没有明确的数量表示，甚至只与评价人的主观感觉与经验有关。例如系统实用的方便性、舒适性。



(2) 不同的方案可能各有所长。例如有 A1,A2 两个方案可供选择,如果在全部指标上,方案 A1 均优于或等于 A2,这是很容易取舍的。但是情况常常是:在一些指标上 A1 比 A2 优越,而在其他一些指标上,A2 又比 A1 优越,这时就很难定夺了。

指标越多,方案越多,问题就越复杂。针对这两个困难,解决的办法是:各项指标数量化,所有指标归一化,这些就是目标实现的标准。

5. 目标实现的标准

1) 指标的量化

指标的量化即标明相应目标达到的程度。

统计指标的量化直接采用统计指标值或由统计公式计算得到。对于功效系数指标的量化问题,可以采用以下方法:设目标为 g,赋予一个功效函数 d,d 的取值为[0,1](也可以是[0,10]、[0,100]等)。当 $d=1$ 时,表示目标完全达到;当 $d=0$ 时,表示目标完全未达到;当 $0<d<1$ 时,表示目标部分达到(d 越接近 1,目标达到的程度越高)。

例如,考察某新型轿车的舒适性的一个指标"宽敞性",对其量化:设 $0<a<b$,假设按规定:$d \leqslant a$ 为不宽敞,$d \geqslant b$ 为宽敞,d 在 a 到 b 之间为较宽敞。则功效函数 d 可以表示为:

$$d=\begin{cases}\text{宽敞}, & d \geqslant b \\ \text{较宽敞}, & a<d<b \\ \text{不宽敞}, & d \leqslant a\end{cases} \tag{3-1}$$

注意:有些功效系数指标通过分解可以部分或全部用统计指标来描述。例如"教师水平"是功效系数指标,其指标分解如图 3-9 所示。分解以后可以用"发表的论文数"、"项目经费数"等统计指标来描述反映"教师水平"的"科研能力"。

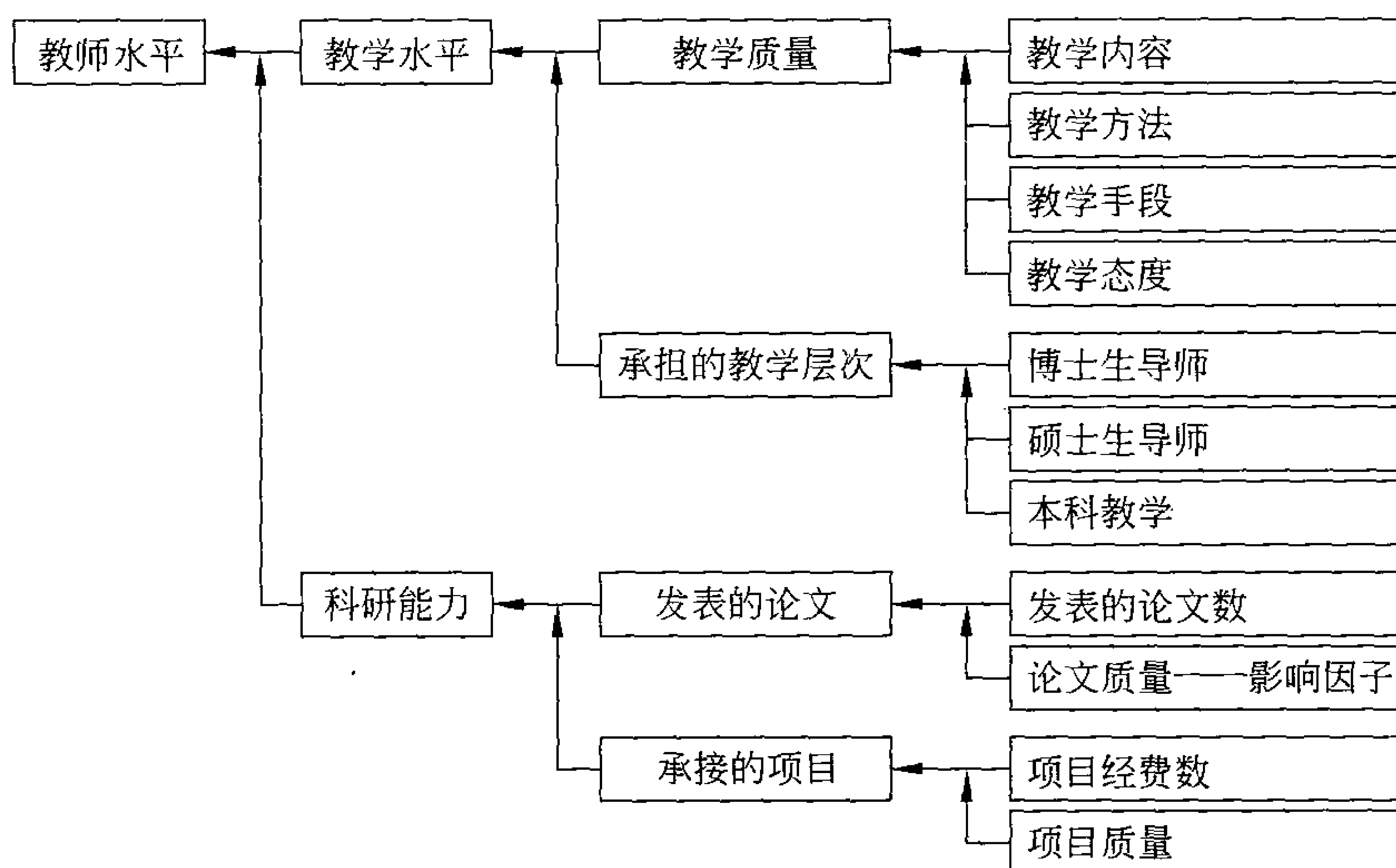
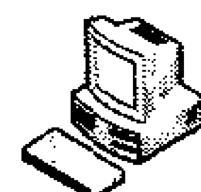


图 3-9 "教师水平"指标分解图



2）指标的归一化

为了说明指标的归一化，先来看一个例子。

例 3-2　有一个目标集 S_g，包含"总产值（total products，TP）"与"废品率（ratio of waste products，RWP）"两个目标。测得 6 个企业的相应数据如表 3-2 所示。现根据这两个目标的指标值综合评价这 6 个企业。

表 3-2　"总产值"、"废品率"6 个企业的测量数据表

企　业	总产值(TP)/万元	废品率(RWP)/%
1	＞350	＜1.1
2	＞320	＜1.08
3	＞310	＜0.9
4	＞280	＜1.2
5	＞250	＜0.8
6	＞270	＜1.1

由表 3-2 可见，企业 1 的总产值（＞350）在 6 个企业中最高，但其废品率（＜1.1）也高；企业 5 的总产值（＞250）在 6 个企业中最低，其废品率（＜0.8）也最低。可以用如下的方法来实现它们的归一化。

"总产值（TP）"指标称做递增型目标。所谓递增，表示指标的值越大，该企业的生产规模越大；而"废品率"指标被称为递减型目标。所谓递减，表示指标的值越大，该企业的生产和管理效率越低。一个企业如果生产规模很大，但其生产的废品率很低，就"总产值"与"废品率"这两个目标综合而言，显然该企业实现目标的程度高，即评分值高。可以使用如下的公式实现递增型指标和递减型指标的归一化：

递增型指标归一化公式：

$$x_i' = \frac{x_i - \min\limits_{0<i<n} x_i}{\max\limits_{0<i<n} x_i - \min\limits_{0<i<n} x_i}, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{3-2}$$

递减型指标归一化公式：

$$x_i' = 1 - \frac{x_i - \min\limits_{0<i<n} x_i}{\max\limits_{0<i<n} x_i - \min\limits_{0<i<n} x_i} = \frac{\max\limits_{0<i<n} x_i - x_i}{\max\limits_{0<i<n} x_i - \min\limits_{0<i<n} x_i}, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{3-3}$$

由表 3-2，递增型指标 TP（总产值）的 6 个指标值 TP_1，TP_2，TP_3，TP_4，TP_5，TP_6 应用公式（3-2），递减型指标 WPR（废品率）的 6 个指标值 WPR_1，WPR_2，WPR_3，WPR_4，WPR_5，WPR_6 应用公式（3-3），归一化结果见表 3-3。

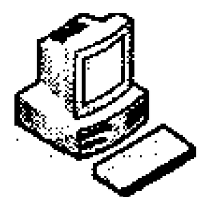


表 3-3　6 个企业的"总产值"、"废品率"归一化数据表

企业	总产值(TP)	废品率(RWP)	综合评分值	目标实现(程度)名次
1	1	0.25	1.25	2
2	0.7	0.3	1	3
3	0.6	0.75	1.35	1
4	0.3	0	0.2	6
5	0	1	1	3
6	0.2	0.25	0.45	5

表 3-3 中的两个目标(TP,RWP)值数据已经无量纲,可以直接进行最简单的加法运算,见表 3-3 中综合评分值这一列。该列反映了综合两个目标的程度分值,6 个企业各自实现目标的程度。

由表 3-3 的综合评分值列数据可见,6 个企业实现目标程度的高低依次为企业 3、企业 1、企业 2、企业 5、企业 6 和企业 4。

例 3-3 应用了指标的归一化得到了 6 个企业实现目标程度的高低评价结果。由此可见,目标的归一化是指综合指标的数值归一。

3) 目标的一致化

由若干目标组成的目标集,其目标间可能存在着各种关系,诸如互补关系、冲突关系。确定目标时,需要对这些关系加以认识,必须的目标保留,冲突的目标弱化。另外,不同的利益集团会根据自身的利益驱动对目标的重要性认识存在差异,当这些利益集团共同来确定目标时,就需要统一大家的认识,这些就是目标的一致化。

(1) 目标集内部的一致化

设目标集 $S_g=\{g_{ij}/i,j=1,2,\cdots,n\}$,目标 g_i 与 g_j 之间的可能关系描述如图 3-10 所示。

例如 g_i(产品的外部造型)与 g_j(产品的内在质量)无关;g_i(产品的销路)与 g_j(产品的质量)相关且呈互补关系;g_i(产品的价格)与 g_j(产品的功能)呈弱冲突关系;g_i(企业改革)与 g_j(稳定员工队伍)可能造成强冲突;g_i(医疗改革)与 g_j(社会主义优越性)呈强冲突关系。

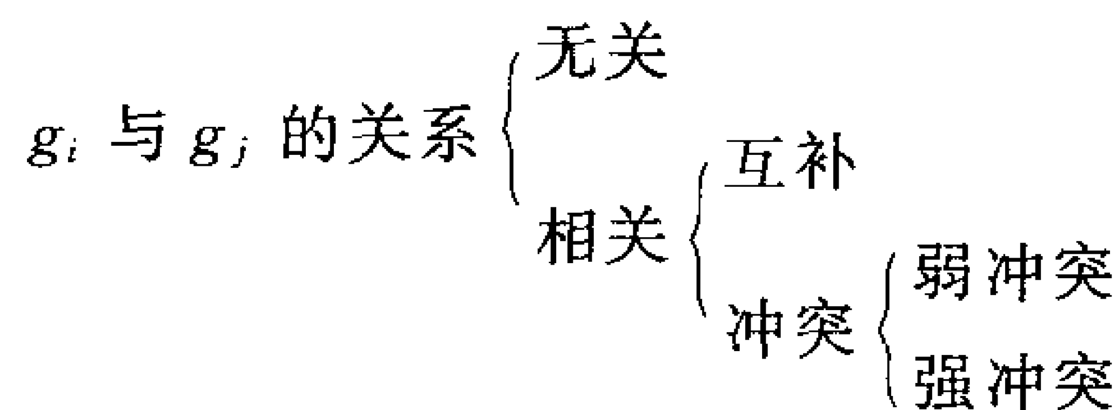
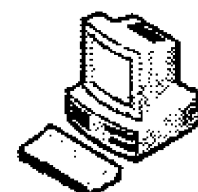


图 3-10　目标的关系图

实现内部目标的一致化可以采取的方法:对"无关"的目标实行保留;对"互补"的目标可以将多余的目标删除;"弱冲突"目标既可以保留,也可以将其中之一作为约束条件(如在一定的价格下使得产品的功能最强);"强冲突"目标必须去掉其中的一个。



(2) 利益集团之间的目标一致化

① 同一问题、同一目标集、不同的利益集团实现目标一致化方法

下面将通过一个例子说明如何对同一问题、同一目标集、不同的利益集团实现目标一致化。

例 3-3　假设有目标集 $S_g=\{g_1,g_2,g_3,g_4\}$={产值,质量,税金,奖金},利益集团集 $M=\{m_1,m_2,m_3\}$={国家,企业,个人}。国家可能认为税金最重要,企业可能认为质量最重要,个人可能认为奖金最重要。从而各 m_i 会对 g_j 给出不同的权重,分值如表 3-4 所示。

表 3-4　不同利益集团目标一致化分值

目　标	m_1 70	m_2 20	m_3 10	$\sum$	权重(W)
g_1	10	6	2	18	0.18
g_2	20	5	2	27	0.27
g_3	30	6	1	37	0.37
g_4	10	3	5	18	0.18
$\sum$	70	20	10	100	1

最终目标集有序性以权数(w_3,w_2,w_1、w_4)=(0.37,0.27,0.18,0.18)给出,即不同的利益集团相对一致地认为目标优先实现的排序为:$g_3>g_2>g_1,g_4$。

② 同一问题、不同目标集、不同的利益集团实现目标一致化方法

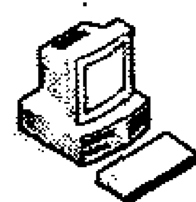
仍然通过一个例子来说明如何对同一问题、不同目标集、不同的利益集团实现目标一致化。

例 3-4　"某学校人才培养定位"问题。假设有目标集 $Sg=\{S_{g1},S_{g2},S_{g3}\}$={{研究型人才},{应用型人才},{技能型人才}},利益集团集 $M=\{m_1,m_2\}$={国家,某学校}。分值如表 3-5 所示。

表 3-5　实现目标一致化的分值

目　标	利益集团		
	S_{g1}	S_{g2}	S_{g3}
m_1	1	2	3
m_2	3	1	2
$\sum$	4	3	5
平均	4/2	3/2	5/2

注:表中数据表示人才培养定位的排序。数据越小,功能定位越重要。



平均值最小者即为两方利益相对一致的目标集，则该学校的人才培养定位为：培养应用型人才。

4）目标的有序化

设各目标 $g_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的重要度即权重为 $W_i(i=1,2,\cdots,n)$，根据目标的重要度 $W_i(i=1,2,\cdots,n)$ 决定实现目标 $g_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的先后次序，将多目标问题转化为单目标问题，逐步实现目标。因此，确定指标的权重是实现目标有序化的方法。例 3-3 给出了实现目标有序化的一种方法。第 4 章介绍的层次分析法可以用来确定系统各目标的权重 $W_i\left(\sum W_i=1\right)$，是实现系统目标有序化的实用方法。

6. 设计目标的方法

目标的确定关系到整个系统工程的方向、范围、投资、周期、人员分配等决策。因此，目标的确定应该建立在科学的设计基础上。目标分层分解法能够帮助我们逐层递级地设计系统目标。例如，开发“满意的计算机”系统，图 3-11 所示为应用目标分层分解法设计其系统目标。

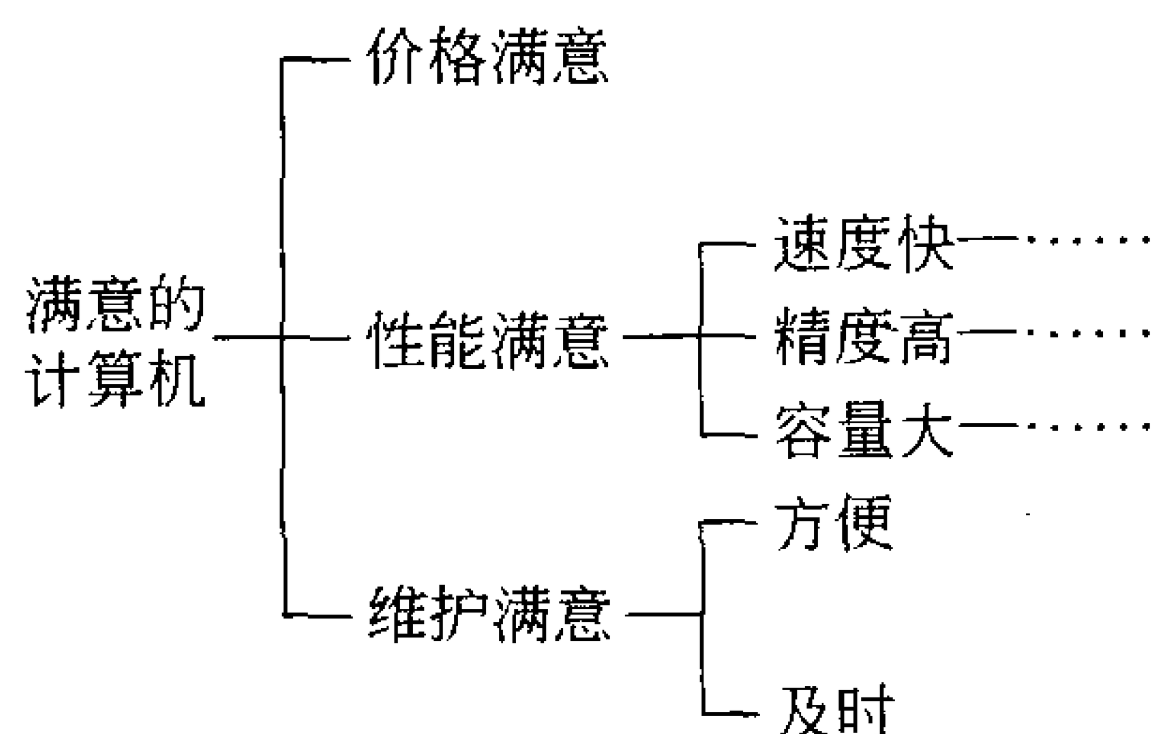


图 3-11　目标分层分解

分层分解法为我们设计出开发“满意”的计算机系统的目标体系。

又如，图 3-12 所示为应用目标分层分解法设计农业系统目标。

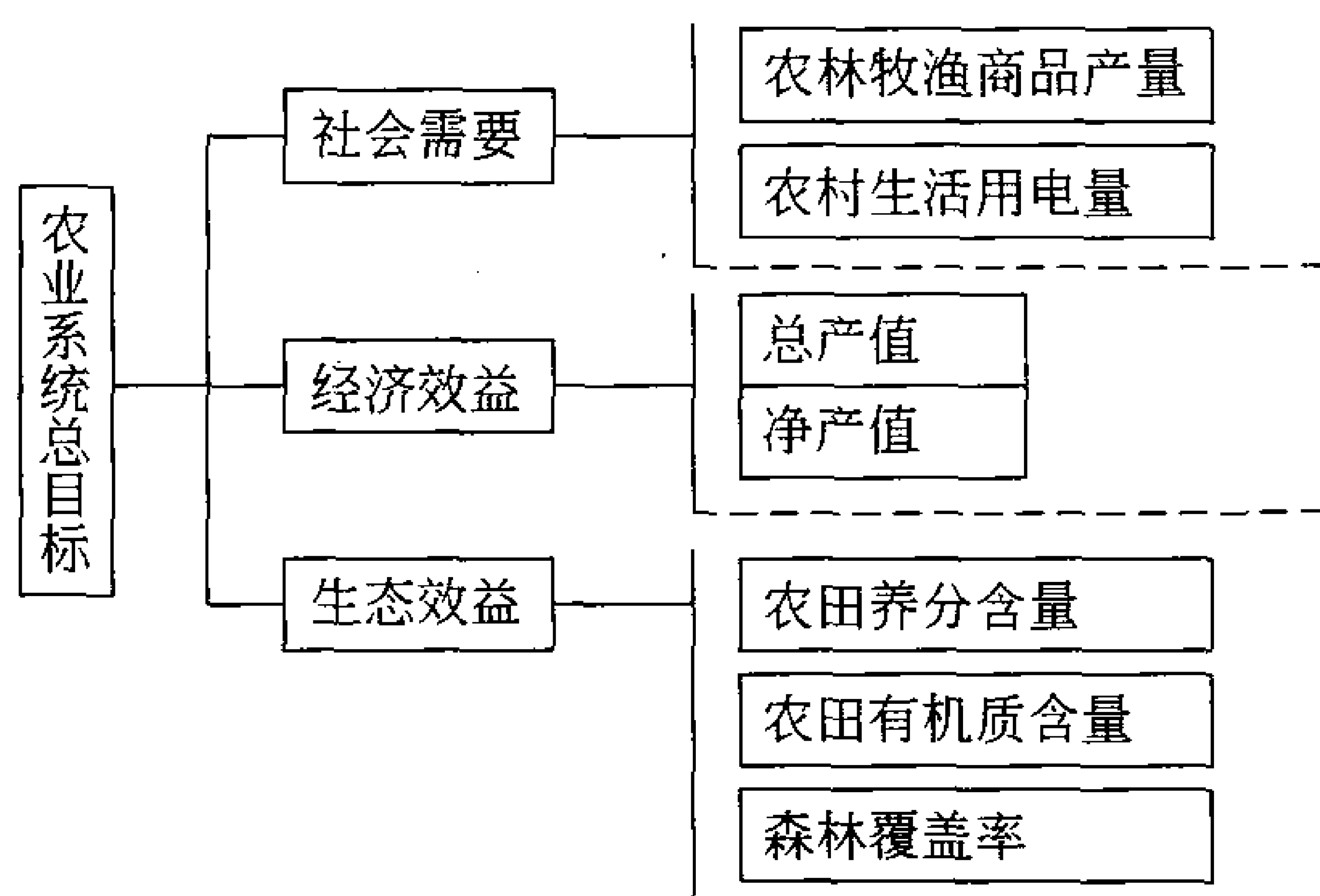
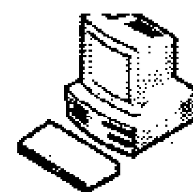


图 3-12　农业系统目标分层分解

由此得到农业系统的目标体系。

综上所述，目标分层分解方法既有利于搞清目标的具体含义，也能够通过低级目标的实现逐级递层达到高级目标的实现。



注意：(1) 分层分解法将总目标分解得到一系列子目标，构成目标体系集，即指标体系。

(2) 分层分解法的难点是目标的分解程度，即分解宽度和深度的确定。分得过宽或过深都会使得系统目标过于复杂，从而加大目标实现的难度。

3.6.3 方案汇总

汇总又称系统综合。确定系统的目标之后，按照逻辑维步骤接下来就是探讨如何实现目标，也就是探讨实现目标(集)的途径、方法、方式和措施，这就是系统的方案。例如，"技术引进"目标可以通过"全部引进国外技术"、"全部引进国内技术"、"关键技术引进国外，其余技术引进国内"等方案实现；"设备更新"有"设备升级改造"、"全部换新"、"升级改造旧设备，增加新设备" 等方案。

按照系统性问题的性质、目标和系统的环境等约束条件，能够分析设计若干可供选择的解决系统性问题的途径和方法。我们把解决系统性问题的每一个途径和方法称为一个备选方案，汇总所有可能的备选方案，就是系统综合步骤要完成的任务。

例 3-5 某运输轮船满载货物从 A 港出发，途经 $C(C_1,C_2,C_3)$，$D(D_1,D_2,D_3,D_4)$ 两个港口补充轮船给养，最终到达目的港 B 港。A 港→C 港→D 港→B 港可选路线见图 3-13。

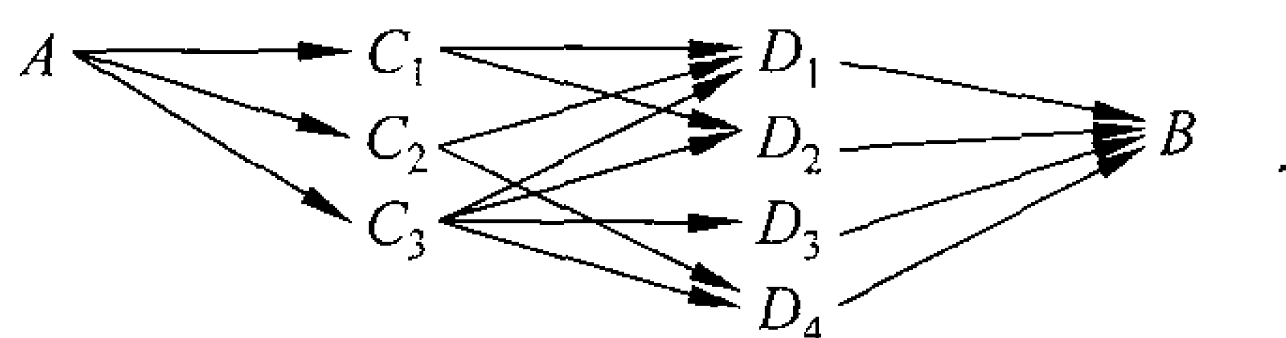
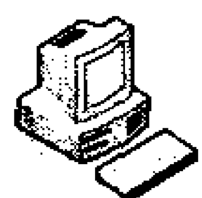


图 3-13 货轮运输路线图

货轮所有可走的路线方案见表 3-6。

表 3-6 货轮运输从 *A* 港到 *B* 港所有路线方案

方案	前行目标		
	$A \to C$	$C \to D$	$D \to B$
1	路线 AC_1	路线 C_1D_1	路线 D_1B
2		路线 C_1D_2	路线 D_2B
3	路线 AC_2	路线 C_2D_1	路线 D_1B
4		路线 C_2D_4	路线 D_4B
5	路线 AC_3	路线 C_3D_1	路线 D_1B
6		路线 C_3D_2	路线 D_2B
7		路线 C_3D_3	路线 D_3B
8		路线 C_3D_4	路线 D_4B



汇总所有的方案有：路线 $A \to C_1 \to D_1 \to B$、路线 $A \to C_1 \to D_2 \to B$、路线 $A \to C_2 \to D_1 \to B$、路线 $A \to C_2 \to D_4 \to B$、路线 $A \to C_3 \to D_1 \to B$、路线 $A \to C_3 \to D_2 \to B$、路线 $A \to C_3 \to D_3 \to B$、路线 $A \to C_3 \to D_4 \to B$。

1. 制定系统方案的原则

制定系统方案应遵循如下原则。

(1) 目的性：方案应该服从于目标，因此在制定方案时必须围绕目标收集尽可能多的资料、信息和数据。例如解决漏油问题的新材料、新涂料、新工艺有哪些，有关的技术性能指标及价格等数据。

(2) 可行性：方案应该满足客观约束条件，必须随时放弃那些客观条件不允许的设想。例如，在解决提高生产能力问题时，对设在市中心的工厂而言，就地扩大生产规模往往不是一个可行的方案。

(3) 详尽性：方案应该是多样的，也就是说要把所有可能的备选方案尽可能地都枚举出来。这里既有一个能力问题，即如何挖掘出可能有的备选方案，也有一个表达的问题，即如何把一切可行的方案表达出来，这往往要借助于系统模型方法才能实现。

(4) 排斥性：方案之间应该是互相排斥的，不允许某一方案全部包含在另一方案中的情况出现。例如技术引进的方案有甲方案——“全部引进国外技术”、乙方案——“全部引进国内技术”、丙方案——“关键技术从国外引进，其余技术从国内引进”，这三个方案具有排斥性。“提高教师水平”有甲、乙、丙三个方案。甲方案是“提高教师的教学水平”，乙方案是“提高教师的科研水平”，丙方案是“提高教师的管理水平”，这三个方案具有排斥性。但是如果将甲方案改成“提高教师的教学质量”，乙方案是“提高教师的教学方法”，则显然乙方案包含在甲方案中，因此方案甲和方案乙不具有排斥性。

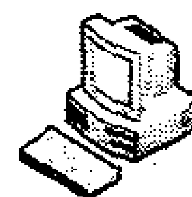
(5) 可比性：方案之间应该能够进行比较，有比较才有鉴别。只有多个方案在性能、费用、时间等指标上具有可比性，才能为评价和决策打下基础。例如例 3-5 货轮运输路线问题，所有的路线方案都可以在距离或时间指标上进行比较，这样就能选出最短路线或最短时间的实施方案。

2. 制定系统方案的方法

不同的系统类型，其功能是不同的，目标当然也是多种多样的。因此，要想尽可能好地汇总方案，既需要具体的工程技术知识和丰富的实践经验，也应该掌握制定方案的几种思维方法。

1) 目标—手段考察法

目标—手段考察法与目标集的确定有关。例如，目标是“提高利润”，可以通过“提高销售量”、“降低成本”等手段实现；而“降低成本”作为新的目标，又可以通过“降低管理费



用”、“降低生产费用”、“减少库存量”等手段实现，从而派生出一系列“提高利润”的方案。由此用目标-手段考察法得到如图 3-14 所示的方案。

再如解决“仓库不敷使用”问题，可以采取“减产”、“缩短生产-销售周期”、“外租仓库”和“扩建仓库”等方案解决。进一步，“外租仓库”又可以通过“临时腾空房”、“临时外租赁”、“长期外租赁”等方式实现；“扩建仓库”可以通过“仓库加层”、“仓库放大”、“新建仓库”等方式实现。从而派生出一系列解决“仓库不敷使用”问题的方案。

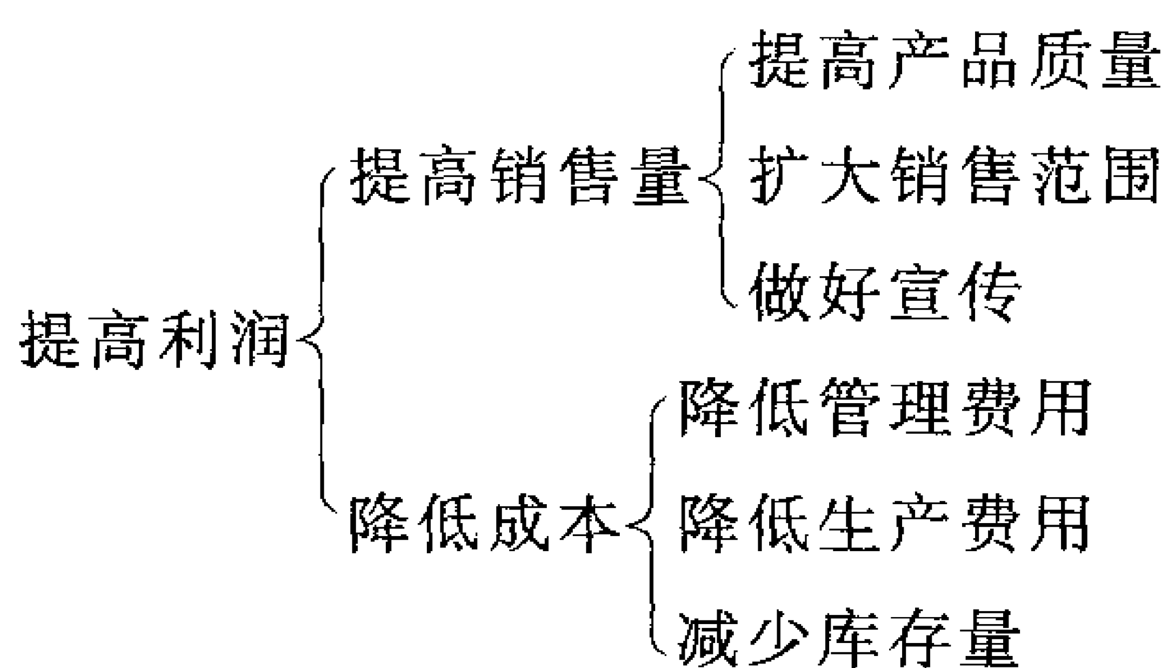


图 3-14　目标-手段考察法下的提高“利润”方案

注意： 利用目标-手段考察法制定方案层次逻辑性强，可以形成：

(1) 目标体系，即指标体系；

(2) 下一级“手段”是实现上一级“目标”的方案，因此又可以得到方案集。

2) 形态结构分析法

形态结构分析法是一种以系统搜索观念为指导，在对问题进行系统分析和综合基础上用网络方式集合各因素设想的方法。其特点是把研究对象或问题分为一些基本的组成部分，通过不同的组合关系得到不同的方案，最后形成解决整个问题的总方案。各总方案中的每一个子方案是否可行，必须采用形态学方法进行分析。

形态结构分析法既可用来探索新技术，亦可用以估计出实现新技术的可能性，为探索未来描绘出一幅清晰的因果关系。这种方法最大的优点是对一项“未来技术”(即形态模型中的一个总方案)进行可行性分析。不足的是当组合个数过多时，即总方案的个数太多时，对各个总方案进行可行性研究比较困难。

形态结构分析法的一般步骤为：

(1) 明确用此方法所要解决的问题(发明、设计)。

(2) 将要解决的问题，按重要功能等标准分成若干基本组成部分，列出有关的独立因素。

(3) 详细列出各独立因素所包含的要素，建立多维矩阵(形态模型)。

(4) 将各要素排列组合，形成所有的解决方案。

(5) 对各个总方案进行可行性研究，并对各个可行的总方案进行比较，从中选出一个最佳的总方案。

例如，设计供残疾人乘坐的三轮车，设计目标为动力、传动、制动等。表 3-7 列出了形态结构二维矩阵 $\boldsymbol{F}$。

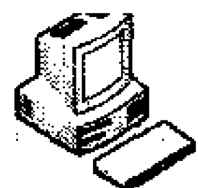


表 3-7 形态结构二维矩阵表

目　标	方　案			
	1	2	3	4
A 动力	人力	蓄电池	小汽油机	其他
B 传动	链条	齿轮	皮带	其他
C 制动	脚闸	手闸	身体	其他
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

取 $f1_{j1}f2_{j2}\cdots fn_{jn}$(其中 $j1\neq j2\neq\cdots\neq jn$)即为一个方案,如取"人力、链条、脚闸……"就是一个设计方案。

注意:(1) 形态结构分析法矩阵 $F_{M\cdot N}$ 给出的方案总数量达 $M\cdot N$ 种之多。只要能把现有科技成果提供的技术手段全部罗列,就可以把现存的可能方案"一网打尽",这是形态分析方法的突出优点。

(2) 运用形态分析过程中要注意把好技术要素分析和技术手段确定这两道关。在寻找实现功能要求的技术手段时,按照先进、可行的原则考虑。根本不可能采用的技术手段不要填入形态分析表中,以避免组合表过于庞大,带来操作上的困难。

(3) 形态分析法结合电子计算机技术的应用,能够快速地从庞大的组合表中进行最佳方案的探索。

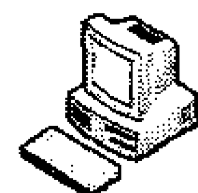
除了上面提到的方法以外,还有一些方法,诸如:

- 集体创造法,也称头脑风暴法(brain storming,BS),这是根据会议提出具体问题—联想—归纳的一种方法。
- 哥顿法,这是一种根据会议提问—各抒己见—总结要点的方法。
- 缺点、希望点枚举法。例如改良粉笔,可枚举其缺点,如多粉尘、易折断、少色彩、难擦尽;枚举其希望点,如像铅笔在纸上写字一样,一按开关就能去掉笔迹,无粉尘飞扬;创造出:乳白色"黑板"、灌彩色墨水的"粉笔"、能渗出溶解剂的"板擦"。

3.6.4 系统评价和决策实施

方案汇总后,需要将各种系统备选方案进行定性与定量相结合的分析、比较。方案尽可能用定量模型表示,这样可以通过模型计算了解系统可能的运行情况,再配以一定的评价准则,这样就能够选择出实现目标的最佳方案。例 3-5 就可以运用运筹学的"动态规划法"建立模型求解最优路线(最短路线)。

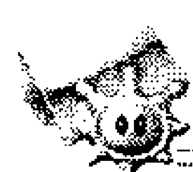
由于模型的种类很多,建立系统模型的有关方法内容十分丰富,具体内容将在第 4 章中详细介绍。



系统评价作为对客观事物进行评定、明确其应用价值的处理方法，已经在社会经济发展、工程技术研究、企业经营管理等各个方面得到了广泛的应用。系统评价方法已经成为系统工程中的一种基本处理方法，是系统分析中的一个重要环节。

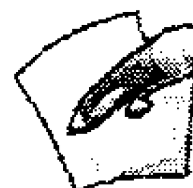
系统评价是方案选优和决策的基础，评价质量的好坏直接影响着决策的正确性，因此方案的评价非常重要。关于系统评价方法将在第5章中介绍。

根据系统评价结果，由决策层根据各方面实际情况和需求，选择一个或若干个方案具体执行。在执行方案的过程中不断反馈实施效果、加强管理。



本章小结

系统工程一直非常重视方法论的研究和探索。很多学者都对系统工程解决问题、处理问题的方法进行过大量的研究，其中最具代表性的且影响较大的是1968年由美国贝尔电话公司、IEEE高级会员霍尔提出的系统工程方法论，即系统工程三维结构体系，简称为霍尔方法论。20世纪70年代中期，英国学者切克兰德经过大量的系统实践，提出了一种软系统方法论。切克兰德软系统方法论旨在提供一套系统方法，其核心概念是人类活动系统。在硬、软系统方法的基础上，人们又着手研究探索硬与软方法兼容、自然科学和人文社会科学结合形成的综合方法论。



思考题

1. “大学城”选址问题考虑的系统要素和环境因素有哪些?

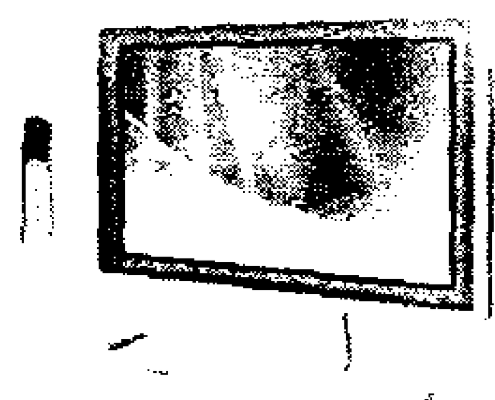
2. 了解你所在专业的培养目标。

3. 试用实例说明如何实现目标的归一化，并给出在指标的归一化过程中所得到的“归一”内涵。

4. 用霍尔方法论的逻辑维解释“教学质量管理系统”。

5. 开发“满意的计算机”，按照霍尔的逻辑维解释这里的“满意”指的是什么，试将“满意”具体化。

6. 以钱学森为代表的我国系统工程研究者们认为，系统工程是组织、管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法。试结合霍尔的方法论谈谈你的认识。



第4章 系统模型方法

本章关键词

系统模型(system model)　层次分析法(Analytic Hierarchy Process)

本章要点

理解系统模型的概念,掌握系统建模的几个主要阶段、建模原则及构建系统模型的一般步骤。以层次分析模型方法为例掌握建模的步骤及层次分析模型方法在社会经济实践中的应用。

系统模型方法是系统工程方法论的逻辑第四步"模型建立"。通过模型对"系统方案"进行汇总,是系统评价的基础,为系统决策选择最优方案提供方法。

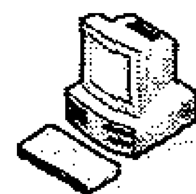
在规划、分析、设计系统时,常常需要定性和定量地了解系统的功能和结构,并对系统的行为进行充分的探讨。例如,自古就有制作实物模型或比例模型进行试验的方法,尤其是在汽车、飞机、桥梁等领域的设计过程中体现得尤为突出。但是,这种方法并非总能实现的。例如,当研究的对象是社会经济这样的大规模、复杂的系统或者是正在运行的核电站、化工厂等无法进行试验的系统时,这种方法就不可行了。因此,针对这类问题,就产生了用数学模型或仿真模型来准确表达系统特征,并能用计算机进行模拟试验的抽象的模型方法。这种方法成本低、风险小,而且不必停止或破坏运行中的系统,可以在极短时间内从某一角度研究系统的行为。

无论什么形式的模型,都对系统工程的研究有很大作用。模型和模拟在系统工程的研究中占有极其重要的地位。

4.1 系统模型概述

4.1.1 系统模型的定义

模型是主体反映客体(即研究对象)、揭示其性质和规律,并且利用和改造客体的手



段。系统模型是用于对系统特征的概括描述、模仿，是对研究对象整体或者局部的抽象。好的系统模型应该能够反映出系统的主要特征或本质属性，能够概括系统的共性。例如飞机风洞试验模型，因其目的是了解飞机外形的空气动力学特性，因此只需将飞机的外形表征完全即可，不必考虑飞机的内部结构。又如，研究种植业结构模型。种植作物有几十种之多，为使模型不致过于复杂，一般以当地主要作物进行研究，便可近似反映种植业系统的基本行为特征。

系统与模型的关系是实体与抽象体的关系。因此，系统模型是对系统这一实体的特征和变化规律的一种抽象，而且是对那些所要研究的特定特征的抽象。模型能够在所要研究的主体范围内更普遍、更集中、更深刻地描述系统的特征。也就是说，在特定范围内，模型比系统更有利于人们的研究。例如，对于一个圆，研究圆周长 L 与半径 R 的关系，其模型是 $L=2\pi R$。虽然模型并不是一个真正的圆，但研究模型比直接研究圆要方便得多。

在系统工程中，系统模型可以用如下式子来表达：

$$V = F(X, Y)$$

式中：V 表示目标函数，用来描述系统的功能、品质或准则值；X 表示可控变量（因素），由相应的约束条件构成一定的取值范围；Y 表示不可控变量（因素），一般指系统外在的环境因素。

从认识论的角度看待模型，模型化的过程可以用图 4-1 表示。

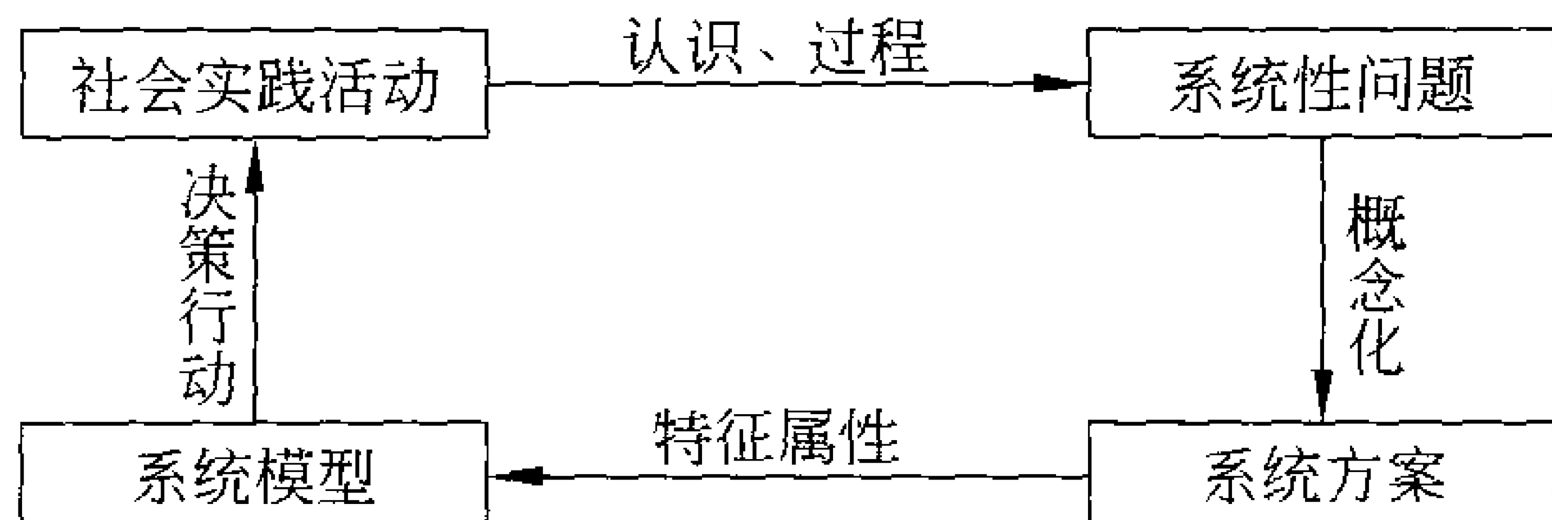


图 4-1　系统模型化过程示意图

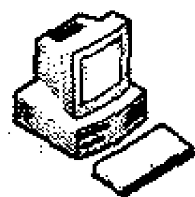
从图 4-1 中可以看出，模型起到了认识和实践的中介作用。模型既可以理解为概念集合的表达系统，又可以理解为创造实践的中间产品。模型既是认识的表达，又是实践活动的先导。模型的构建是参与认识世界、改造世界的一个不断循环往复的过程。

注意：建立系统模型时，主要考虑状态和过程两个方面。从系统概念上看，模型是系统中各种关系的表达形式。因此，在建立系统模型时，要从状态和过程两个方面去寻求、把握、描述各系统要素之间的相互关系。

所谓状态，是指事物在某个时刻所处的状况和表现形式。状态是事物特征的描述和度量，事物的状态一般由一组变量来表征。

所谓过程，是指事物状态的变化在时间上的持续和空间上的延伸。

过程和状态两者紧密联系、不可分割。



4.1.2 系统模型的基本特征

对于同一系统，由于研究目的(目标函数)的不同，需要研究的特征和运动规律就会不同，建立的模型也会有所不同。即使出于相同的研究目的，对于同一个系统，也可能建立不同形式的模型，用于反映不同的研究角度、考察因素和价值取向等。也就是说，模型是多样的。例如可以用模型 $L=2\pi R$ 研究圆的周长与半径的关系，也可以建立模型 $S=\pi R^2$ 来研究圆的面积 S 与半径 R 的关系。

一般来说，模型具有下面的基本特征。

(1) 模型是现实系统的抽象或模仿，是进行推理和判断的基础。

(2) 模型反映了系统的本质或特征，由一些与分析问题有关的因素所构成，是以科学试验为依据的。

(3) 模型集中体现了系统主要因素之间的关系，一般需通过分析系统的关键特征，进行对比研究，最后得出相应的结论。

(4) 模型高于实际系统而具有同类问题的共性，并且同一系统可以用不同的模型来表达。

(5) 模型是进行定量分析和解决问题的工具，可以帮助工程人员进行预测，做出适当的决策。

建立系统模型是一种创造性的劳动，不但是一种技术，更是一种艺术。所谓“戏法人人会变，各有巧妙不同”。对于同一个系统，不同的人员建立的模型可能大不相同，有巧拙优劣之分。企图提出一些对一切系统都能照搬、照用的教条显然是不现实的，必须一切从实际出发，具体问题具体分析。必须实事求是，把理论与实践相结合才能解决问题。

系统模型的种类很多，下面介绍模型的分类，目的在于从不同的角度来认识模型的多样性，选择适当的模型建立以研究系统。

4.1.3 系统模型的分类

从模型的表达形式、模型的目的和模型特性等方面，可以将系统模型进行分类，如图 4-2 所示。

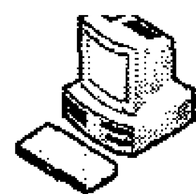
1. 系统模型的表达形式分类

1) 物理模型

所谓“物理”，是对具有物质的、具体的、形象的含义的一种泛指。实体模型、比例模型、替代模型、相似模型等都属于物理模型。例如，标准件的生产检验是从总体中抽取一定数量的样本进行的，样本就是实体模型。房模、人体模型、地球仪、儿童玩具等也都属于物理模型。

2) 数学模型

数学模型运用数学符号和各种关系式来表达系统各组成部分相互关系和运动过程。



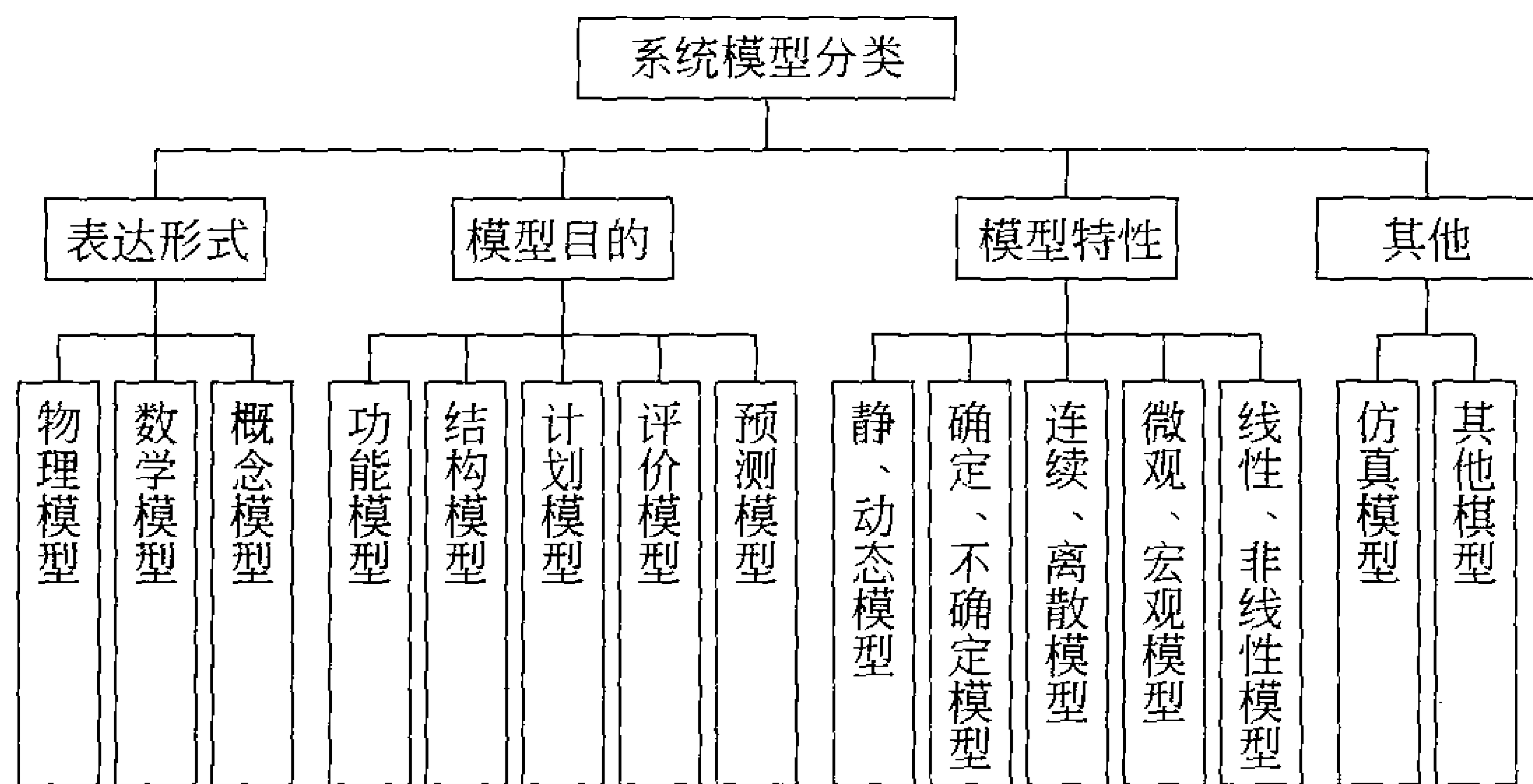


图4-2　系统模型的分类表示

数学模型解决了对系统进行定量描述的问题，而且为计算机模拟提供了条件，所以它是系统分析中最重要的一种模型，也是使用得最多的一种模型。

数学模型可以处理多变量、关系复杂的问题，可在有意义的范围内获得令人满意的计算精度，因此特别适合于揭示事物的量的规律，成为定量研究的有力工具。函数模型、网络模型、逻辑模型等都属于数学模型。在系统工程中，最常用的数学模型是运筹学模型，如各种规划模型。

和其他系统模型相比，数学模型还具有如下特点。

(1) 高度的抽象性。数学模型不仅要抛开事物的次要属性、突出事物的本质属性，而且要舍弃事物的物质和能量方面的具体内容，只考虑其数量关系和空间形式，同时还要把这些数量关系和空间形式进一步抽象，加以形式化和符号化，以便能够进行逻辑推理和数量运算。

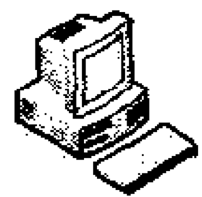
(2) 高度的精确性。主要表现在三个方面：一是表达各种因素、变量以及它们之间的关系相当明确、清楚；二是逻辑推演和运算规则十分严密；三是结论非常确定。

(3) 应用的普遍性。数学方法比任何一种科学方法的应用范围都更为广泛。许多相同形式的数学模型可用于不同的实际问题中，具有重要的类比和借鉴意义。数学方法的形式化和公式化，使模型本身、计算过程和计算结果都便于交流。数学模型易改动，便于修改参数和改变计算关系，分析和求解问题速度快，求解成本低。特别是同计算机相结合时，这些特点就表现得更加突出。

尽管数学模型缺乏直观性、形象性和实时感，但这并没有阻碍数学模型方法的普及使用。

3) 概念模型

概念模型是一种在以往经验的基础上，运用已掌握的知识对考察对象进行理性的分析，然后借助于文字描述出思维的模型。例如任务书、说明书、技术报告等都是概念模型，



对某系统的定义、数学定理、运算的定律等都属于概念模型，甚至表达概念的示意图等都属于概念模型。

虽然概念模型不如数学模型精确，也不像物理模型那样形象生动，在工程技术中也难以直接使用，但是当需要解决的系统性问题尚不明确时，建立物理模型或数学模型有一定的难度，这时就需要用到概念模型。

2. 系统模型的目的分类

按照建立模型的目的，可以将系统模型分为功能模型、结构模型、计划模型、评价模型和预测模型。

1）功能模型

为详细探讨系统的稳定性、可控性等动态特征，或者系统的可靠性、安全性、持久性、易操作性等特性和功能而建立的模型称为功能模型。

功能模型是在控制论领域中常用的模型，包括传递函数模型、状态变量模型。

2）结构模型

为反映系统各个组成要素以及各组成要素之间的关系、层次结构等信息而建立的模型称为结构模型。一般来说，结构模型都是将实物的结构关系简化后得来的，关键是要体现要素之间的连接关系，例如在第 2 章中介绍的解释结构模型（ISM）方法。结构模型可以简洁、直观地反映元素之间的连接关系。

3）计划模型

为最优化生产计划、运输计划、工程管理、人员配置、调度等工作计划和日程进度而生成的模型称为计划模型。如运筹学图论中的关键路线、计划评审技术等。

4）评价模型

评价模型是指综合评价系统的功能、成本、时间、性质、可靠性等各项或若干项指标的模型。如层次分析模型、模糊综合评价模型、效用函数模型等。

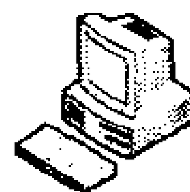
5）预测模型

利用研究对象过去及现在的数据尽可能准确地预测系统的将来值，或系统未来发展状况而产生的模型称为预测模型。

预测模型包括时间序列模型、静态系统预测中常用的多重回归模型、动态系统预测中常用的自回归移动平均模型（ARMA 模型）等。这些预测模型经常用于社会、经济、交通等大型复杂系统的预测，如社会保险基金良性运营预测、经济总量预测、交通流量预测等。

3. 系统模型的特性分类

按照模型反映的系统特性，模型可以分为静态模型和动态模型、确定模型和非确定模型、连续模型和离散模型、微观模型和宏观模型、线性模型和非线性模型等。



1）静态模型和动态模型

系统的输出不依赖于过去的输入，只取决于当前输入的模型称为静态模型；反之，系统的输出不仅依赖于过去的输入，而且依赖于当前输入，即系统的输入输出关系是时间的函数、时间为独立变量的模型称为动态模型。

通常情况下，静态模型用数学中的代数方程和逻辑方程等描述，动态模型用含时间变量的积分方程和偏微分方程等描述。

2）确定模型和非确定模型

系统的输入输出和系统参数的性质是确定的，且不考虑随机因素的模型称为确定模型。确定模型用微分方程、差分方程等描述。系统的输入输出和系统参数的性质不确定，且模型中包括随机性和模糊性参数的模型称为非确定模型。非确定模型用概率统计、模糊数学、马尔可夫链等描述。

注意：确定模型和非确定模型的区分要从问题的本质上来判定。在一定条件下，必然发生的现象是确定性的，而在一定条件下，可能发生、可能不发生的现象则是不确定的或随机的。在系统工程中，不确定性还分为统计不确定性和现实不确定性，对前者只能认识不能改变。如投掷一枚硬币，究竟哪一面在上是不确定的，但可以认识到每一面在上的概率各为50%。对不确定性或随机性，要具体分析其特征状态和成因，才能构建出切合实际的模型。

3）连续模型和离散模型

输入输出在时间上是连续变化的模型称为连续模型。而输入输出在有一定时间间隔时才发生变化的模型称为离散模型。连续模型可用微分方程、时间序列模型等描述。离散模型可用差分方程、随机事件模型等描述。如固体的变形和液体的流动是连续的，而列车的出发和到站则是离散的。

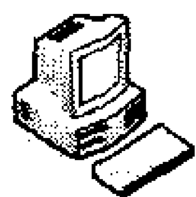
4）微观模型和宏观模型

从瞬间和微观的角度捕捉系统的行为和特性，以分析研究系统的微小构造和瞬间变化为目的的模型称为微观模型；反之，从时间和宏观的角度捕捉系统的行为和特性，以分析研究系统的整体构造和长远变化为目的的模型称为宏观模型。微观模型一般用微分方程或差分方程描述。宏观模型一般用联立方程或积分方程描述。

5）线性模型和非线性模型

系统特性或输入输出关系呈线性关系的模型称为线性模型。而系统特性或输入输出关系呈非线性关系的模型称为非线性模型。如线性规划（目标规划、整数规划）模型等属于线性模型。动态规划、风险决策模型等属于非线性模型。

还有仿真模型，是指无法完全用一个数学式子来表达系统变化规律，只能模拟实际情况一步一步进行计算和分析的模型。处理随机服务系统时往往采用仿真模型。



此外还有不少对模型的分类。例如可以根据学科性质将模型分为运筹学模型、计量经济学模型、投入产出模型、经济控制论模型、系统动力学模型。

4.1.4 系统模型的作用

结合上面模型分类的介绍，可以归纳出系统模型的作用。

(1) 便于了解系统的整体结构。例如，建立了系统的逻辑模型以后，可以更好地了解要素之间的逻辑关系，搞清楚什么是最高级要素，以及要素的反馈集等概念。

(2) 便于研究系统的特征。例如，建立了比例模型后，可以在船池中对船模进行研究。对样本的研究可以推断总体的特征，具有经济性。仿真模型的建立可以在电子计算机上运算仿真出真实服务系统诸如排队人数等重要特征。

(3) 便于预测未来的趋势。例如，如果建立城镇居民对食品的需求与收入之间的数学解析模型 $y=\frac{ax}{x+b}$，则可以预测当城镇居民收入 x 增加时，其对食品的需求 y 将逐步增长。但当收入 x 增加至某一较大数值时，需求 y 将趋于某一常数 a。

(4) 便于对方案进行评价和决策。例如，如果在核武器的毁伤值(K)与其 TNT 当量(y)、命中精度(x)之间建立数学模型 $K=\frac{y^{\frac{2}{3}}}{x^2}$，假设有两个方案 A 和 B，经过计算方案 A 可使毁伤值 K 提高 4 倍，方案 B 可使毁伤值 K 提高 64 倍，那么显然评价结果是采取方案 B。

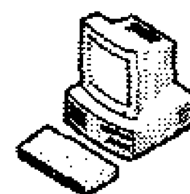
4.2 建立系统模型的思考方法

针对不同的系统对象，可以采取不同的方法建造系统模型，其中主要的方法有下面几种。

(1) 直接分析法(推理法)，是指利用已知科学规律来表达系统要素之间的某些结构关系，经过一定的分析和推导得到模型的方法。例如运筹学中的线性规划方法。我们总是把目标用线性函数表示出来，把约束条件用线性等式或不等式表示，从而写出线性规划模型。

(2) 数据分析法(统计法)，是指采用反映系统功能或特征的某些数据，经过统计分析后揭示出系统要素之间的未知结构关系进而构造模型的方法。例如回归分析方法就是一种数据分析方法。

(3) 比拟思考法，是指寻找与所研究的系统有本质共性的另一系统，把后者作为模型的方法称为比拟思考法。利用一个已知系统模型，按照两系统的对应关系可求得未知系统的模型，这个方法简化了模型数量描述和求解过程。例如，求从 A 地到 B 地的最短路径问题，可以先找出从 A 地到 B 地之间的一切中间节点(交叉路口)C_1，C_2，…，C_n，然后找



出 A 与 C_i、C_i 与 B 及 C_i 与 C_j 之间有路相通的路段并量出它们的长度，再按比例剪出各路段对应的短绳，仿照 A-C_i-B 之间的关系打上结，这样一个用短绳结成的道路网络模型就做好了。要求出 A 点到 B 点的最短路径，只要按住 A 点、B 点所代表的绳端，拉紧后的短绳段就是所求的最短路径。

（4）德尔菲法（Delphi technique），这是一种专家调查法，往往需要设计调查表的人对所选专家的意见进行多轮调查并进行统计分析、归纳和不断综合，以此来构建科学合理的模型。

4.3　建立数学模型的一般步骤

数学解析模型具有众多的优点，是系统工程中常用的模型。建立数学模型的一般步骤如下。

第一步，明确目标，即明确需要建立的系统模型的目的、功能和要求。

第二步，建立系统的文字概念模型，确定模型的种类、形式和规模。

第三步，分析理清系统中各要素及其间相互关系和因果关系，列出主要要素、主次关系。

第四步，找出环境限制（即找出系统的约束条件）。

第五步，确定模型结构，根据有关学科知识初步建立系统模型。即根据相关知识，用数学符号、数学式子表达变量之间的关系，完整地描述目标和约束。

下面通过一个例子来说明构建数学模型的过程与方法，并不要求计算结果。

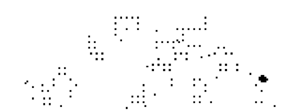
例 4-1　某校学生会要在全校学生中公开选聘文艺部、宣传部、外联部三名部长。几轮筛选下来，仅剩下甲、乙、丙三名候选人。根据民主评议的统计结果，他们主持各个部的工作能力（以得分多少来衡量）如表 4-1 所示。试从工作能力出发，确定最优选拔部长方案。

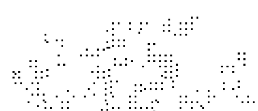
表 4-1　学生干部选拔民主评议统计结果表

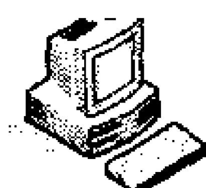
	文艺部	宣传部	外联部
	工作能力/分		
甲	35	30	27
乙	37	35	29
丙	38	28	32

现在根据题意来构建求解最优选拔部长的方案。

第一步，明确目标。即三名学生部长承担的三个部门总工作能力发挥最大。







第二步，建立系统的文字概念模型。设 $i=1,2,3$ 分别表示甲、乙、丙三名候选人；$j=1,2,3$ 分别表示文艺部部长、宣传部部长、外联部部长；a_{ij} 表示第 i 名候选人担任第 j 个部门的部长工作能力分值；x_{ij} 表示第 i 名候选人担任第 j 个部门的部长；Y 表示三名部长总的工作能力分值。

第三步，系统中各变量及其间相互关系为

$$A=(a_{ij})=\begin{bmatrix}35 & 30 & 27\\ 37 & 35 & 29\\ 38 & 28 & 32\end{bmatrix}$$

$$x_{ij}=\begin{cases}0, & i\text{ 候选人不担任 } j \text{ 部门部长}\\ 1, & i\text{ 候选人担任 } j \text{ 部门部长}\end{cases}$$

第四步，约束条件：

$$\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{3}x_{ij}=1, & j=1,2,3\\ \sum\limits_{j=1}^{3}x_{ij}=1, & i=1,2,3\\ x_{ij}=0,1, & i,j=1,2,3\end{cases}$$

第五步，构建数学模型。

$$\max Y=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}a_{ij}x_{ij}$$

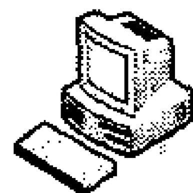
$$\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{3}x_{ij}=1, & j=1,2,3\\ \sum\limits_{j=1}^{3}x_{ij}=1, & i=1,2,3\\ x_{ij}=0,1, & i,j=1,2,3\end{cases}$$

该数学模型可以运用运筹学中的最大化指派问题（0-1 整数规划的特殊情况）求解最优方案。

4.4 建立系统模型的一般原则

模型是实体的抽象反映，根据上述方法建立模型的时候，应适当遵循一定的建模原则，以增大模型的实用性和准确性。

（1）目标切题。即使是同一个系统，研究的目的不同，建立的模型也不同。因此，模型只应包括与研究目的有关的方面，而不是包括对象系统的所有方面。在建立模型时，应



抓住要解决问题的主要方面和本质部分，切忌面面俱到。例如，对一个空运指挥调度系统的研究，建模只需考虑飞机的飞行航向、航班，而无须考虑其飞行姿态、飞机性能等。

(2) 层次清晰。一个大型的复杂系统是由许多密切联系的子系统(模块)组成的，与此相对应，一个系统模型也是由许多子模块组成的。在子模块与子模块之间，除了保留研究目的所必要的信息联系外，其他的耦合关系要尽可能减少，且尽可能用层次结构表示子模块之间的关系，以保证模块结构的清晰、简洁、易懂。

(3) 精度适当。建立系统模型时，应该视用户需求、研究目的及使用环境的具体情况来选择适当的模型精度，以保证模型切题、实用而又不至于过度耗时耗力。一般来说，通常模型的精度取决于模型的简单程度。但是，不论精度多高，如果模型过于复杂也难以使用；反之，过于简单的模型，精度太差也不能采用。这就需要在确定组成要素时，兼顾这两方面的要求。

(4) 验证模型。模型建立后需要验证其合理性和精度。当验证结果不理想时，要通过重新探讨建模时确定的假设，修改模型中采纳的组成要素和模型结构，调整模型的参数，以此来修正模型。另外，在验证模型时，除了验证精度外，还要注意确定模型的适用范围，以及模型得出的结论的可信度。

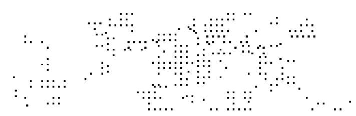
4.5 建立系统模型的 AHP 方法

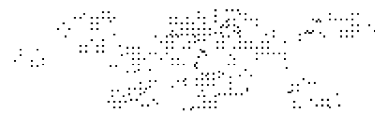
第 2 章介绍了解释结构模型(ISM)方法。ISM 方法的特点是把复杂的系统分解为若干子系统(或要素)，利用人们的实践经验和知识以及电子计算机的帮助，最终将系统构造成一个多级递阶的结构模型。ISM 方法虽然使用了诸如矩阵、布尔运算等数值方法，但结论仍是定性的，它不能告诉决策者或分析人员各元素与目标元素之间关系的依赖程度到底有多大。层次结构分析模型不仅能够构建系统要素的层次解释结构关系，同时还能够定量地给出，在这个多级递阶结构模型中系统各元素与目标元素之间关系的依赖程度。

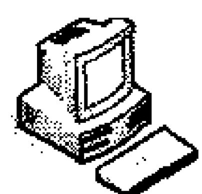
层次分析(analytic hierarchy process，AHP)法由美国匹茨堡大学教授 T. L. 萨坦(T. L. Saaty)于 20 世纪 70 年代末提出，它是一种实用的多层次权重解析结构分析法。AHP 方法将定性与定量相结合，通过合理地处理各种决策因素，将人的主观判断按照思维的规律得到系统的层次化、数量化的模型。因其系统性强、使用方便的特点，迅速地在我国社会经济各个领域内得到了广泛的重视和应用。

4.5.1 AHP 模型方法的基本思想

AHP 模型方法以先分解后综合的系统思想整理和综合人们的主观判断，对复杂系统所要分析的各种因素，根据问题的性质和要达到的总目标，将问题要素分解成不同的组成







因素，依照因素间的相互关系及隶属关系按不同层次聚集组合，形成一个多级递阶结构。以上层某一因素为准则，对下层各因素进行分析和比较，按判断尺度建立判断矩阵，再通过一定的计算，以得到不同因素的优先级权重。最终归结为最低层（方案、措施、指标等）相对于最高层（总目标）相对重要程度的权值或相对优劣次序的问题，为抓住主要因素提供依据。

4.5.2 AHP 模型方法的基本步骤

运用 AHP 方法构建多级递阶层次结构时，一般具有四个步骤。

第一步，建立由目标层、准则层、方案层构成的层次结构模型。

第二步，根据准则层构造方案层的判断矩阵，计算各层次元素相对于该准则的权重。

第三步，进行层次单排序及一致性检验。

第四步，计算各层次元素对系统目标的合成权重，进行层次总排序及一致性检验。

下面分别就 AHP 的四个基本步骤的实现过程给予说明。

1. 建立由目标层、准则层、方案层构成的层次结构模型

一般由目标层、准则层、方案层构成的层次结构模型如图 4-3 所示。例如，“企业利润的合理使用”层次结构模型见图 4-4，“就业选择”的层次结构模型见图 4-5。

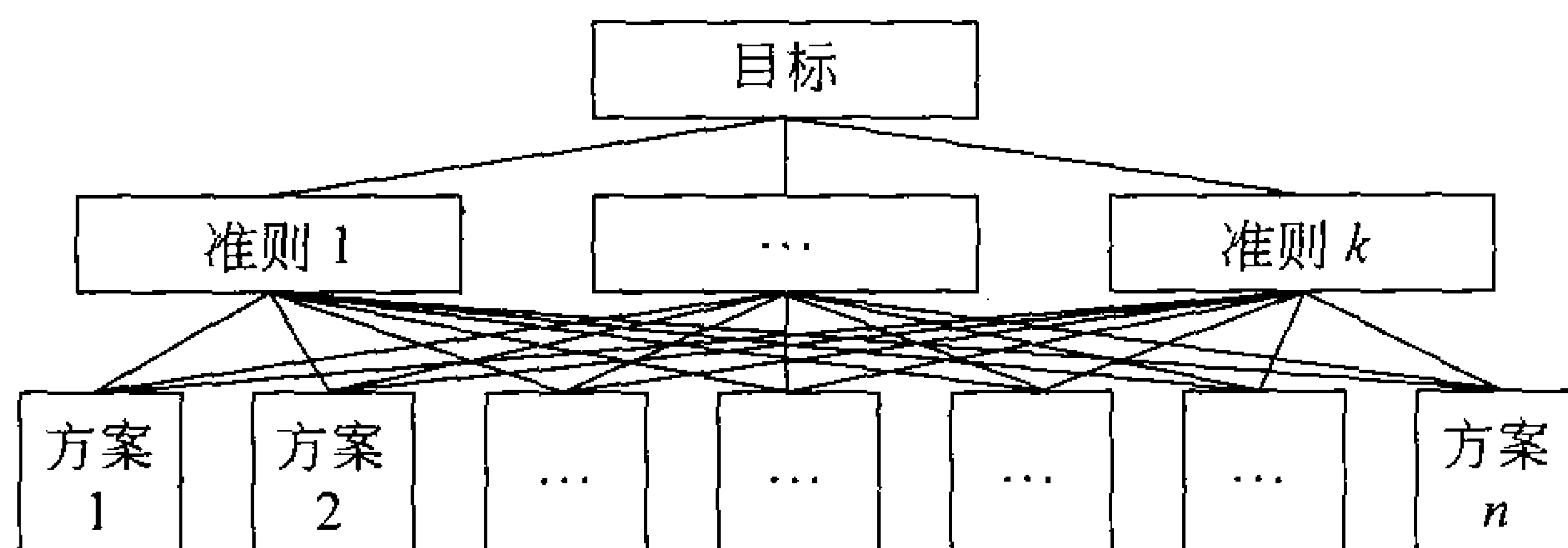


图 4-3 层次结构模型

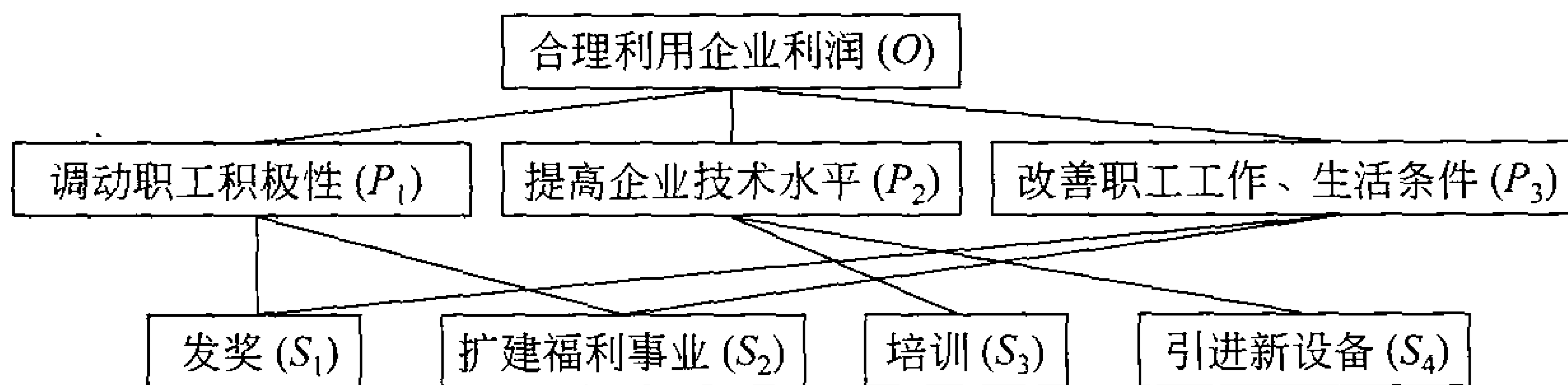
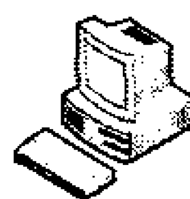


图 4-4 “企业利润的合理使用”层次结构模型

2. 构造两两判断矩阵，计算各层次元素的权重

判断准则（经验尺度）为：记 H_s 为评价准则，S_i 为评价因素，则评价判断分值见表 4-2。



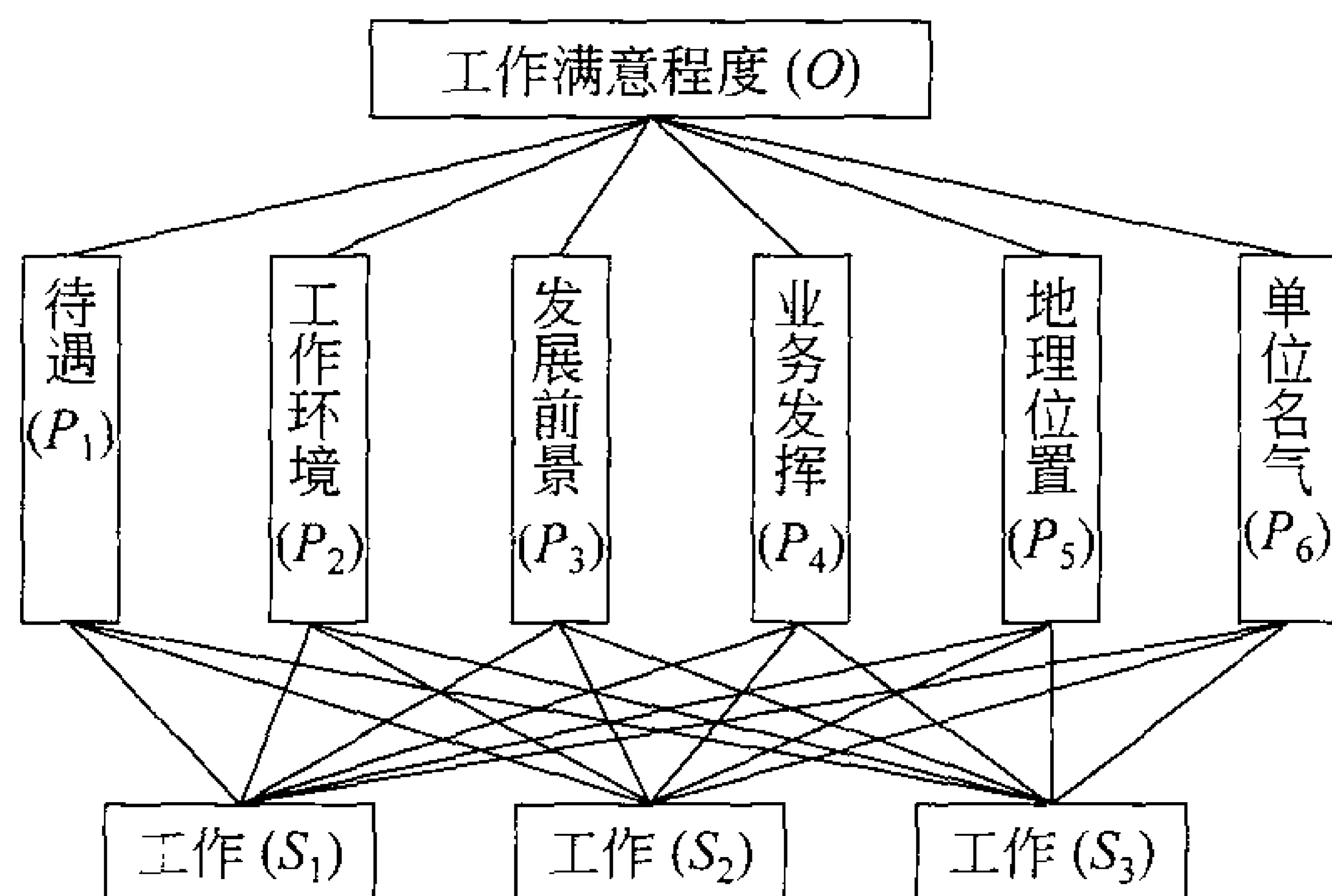


图 4-5　“就业选择”的层次结构模型

表 4-2　判断分值表

判断尺度	定　义	判断尺度	定　义
1	相对于 H_s 而言，S_i 和 S_j 同样重要	7	相对于 H_s 而言，S_i 比 S_j 重要得多
3	相对于 H_s 而言，S_i 比 S_j 略微重要	9	相对于 H_s 而言，S_i 比 S_j 绝对重要
5	相对于 H_s 而言，S_i 比 S_j 重要	2,4,6,8	界于上述两相邻判断尺度的中间

相对于上一层某个准则，n 个两两被比较的元素构成了一个两两比较矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\cdot n}$。判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中的元素 a_{ij} 具有下述性质：

$$a_{ij}>0,\quad a_{ji}=1/a_{ij},\quad a_{ii}=1 \tag{4-1}$$

例如，在“企业利润的合理使用”层次结构模型（图 4-4）中，比较“调动职工积极性（P_1）”与“提高企业技术水平（P_2）”这两个因素。相对于“合理利用企业利润（O）”评价准则，企业认为“提高企业技术水平（P_2）”比“调动职工积极性（P_1）”重要。所以 $p_{21}=5$；反之，则 $p_{12}=1/5$。

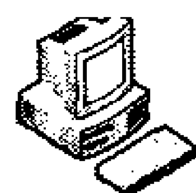
又如，在“就业选择”的层次结构模型（图 4-5）中，相对于“工作满意程度”评价准则，其“待遇（P_1）”和“工作环境（P_2）”这两个因素进行比较，就业者认为，“待遇（P_1）”与“工作环境（P_2）”同等重要。则 $p_{12}=1$；反之也有 $p_{21}=1$。

由此可以建立“合理利用企业利润”层次结构模型（图 4-4）中 P 层相对于 O 层（记为 P/O）的比较矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/3\\ 5 & 1 & 3\\ 3 & 1/3 & 1\end{bmatrix} \tag{4-2}$$

3. 层次单排序及一致性检验

这一步需要解决两个问题，一个问题是根据判断矩阵求出层次各因素的权重，再根据



权重大小给出层次单排序。这种层次单排序是建立在判断矩阵一致性的前提下。因此，另一个问题是检验判断矩阵的一致性。

1）层次元素单排序权重方法

一般采用下面的三种方法之一求层次元素的权重。

（1）方根法

方根法提出得较早，在 AHP 中被广泛应用。设有两两比较矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\cdot n}$，用方根法求层次元素的权重步骤如下。

步骤一，求 $\boldsymbol{A}$ 的每行元素积：$M_i=\prod_{j=1}^{n}a_{ij},i=1,2,\cdots,n$

步骤二，求 M_i 的 n 次方根：$\overline{M_i}=\sqrt[n]{M_i}$

步骤三，对 $\overline{M}_i$ 标准化：$w_i=\dfrac{\overline{M}_i}{\sum\overline{M}_i}$，$i=1,2,\cdots,n$

由此得到层次元素权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$。

（2）迭代法

迭代法也是求层次元素权重的重要方法。用迭代法求层次元素的权重步骤如下。

步骤一，任取一个标准化向量 $\boldsymbol{w}^{(0)}$，指定一个精度要求 $\varepsilon>0(k=0)$。

步骤二，迭代计算：$\overline{\boldsymbol{w}}^{(k+1)}=\mathrm{A}\boldsymbol{w}^{(k)},k=0,1,\cdots$。

步骤三，标准化：$\boldsymbol{w}^{(k+1)}=\dfrac{\overline{\boldsymbol{w}}^{(k+1)}}{\sum\overline{\boldsymbol{w}}_i^{(k+1)}}$，当 $|\boldsymbol{w}_i^{(k+1)}-\boldsymbol{w}_i^{(k)}|<\varepsilon$ 迭代终止。

由此得到层次元素权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$。

（3）和积法

用和积法求层次元素的权重步骤如下。

步骤一，将比较矩阵的列标准化：$\bar{a}_{ij}=\dfrac{a_{ij}}{\sum a_{kj}}$，令 $\overline{\boldsymbol{A}}=(\bar{a}_{ij})$。

步骤二，将 $\overline{\boldsymbol{A}}$ 按行相加：$\overline{M}_i=\sum\bar{a}_{ij}$。

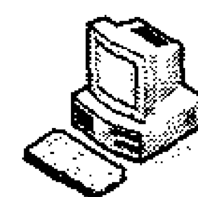
步骤三，对 $\overline{M}$ 标准化：$w_i=\dfrac{\overline{M}_i}{\sum\overline{M}_i}$。

由此得到层次元素权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$。

2）权重计算示例

例 4-2 应用方根法求“合理利用企业利润”层次结构模型（图 4-4）中相对于 O 层评价准则的 P 层元素权重。设 P/O 层的两两比较矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/3\\ 5 & 1 & 3\\ 3 & 1/3 & 1\end{bmatrix}$$



步骤一，求 $\boldsymbol{A}$ 的每行元素积：$M_i = \prod_{j=1}^{3} a_{ij}, i = 1,2,3$

所以：$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\times\frac{1}{5}\times\frac{1}{3} \\ 5\times1\times3 \\ 3\times\frac{1}{3}\times1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{15} \\ 15 \\ 1 \end{bmatrix}$

步骤二，求 M_i 的 3 次方根：$\overline{M_i} = \sqrt[3]{M_i}$

所以：$\overline{\boldsymbol{M}}=\begin{bmatrix} \overline{M}_1 \\ \overline{M}_2 \\ \overline{M}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt[3]{\frac{1}{15}} \\ \sqrt[3]{15} \\ \sqrt[3]{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.405 \\ 2.466 \\ 1 \end{bmatrix}$

步骤三，标准化 $\overline{M}$：$w_i = \dfrac{\overline{M}_i}{\sum \overline{M}_i}$，其中 $\sum \overline{M}_i = 3.871$。

所以：$\boldsymbol{w}=\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.405/3.871 \\ 2.466/3.871 \\ 1/3.871 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.105 \\ 0.637 \\ 0.258 \end{bmatrix}$

相对于 O 评价准则，求得 P 层元素权重向量（记为 $\boldsymbol{w}^{P/O}$）为

$$\boldsymbol{w}^{P/O} = (0.105, 0.637, 0.258)^{\mathrm{T}}$$

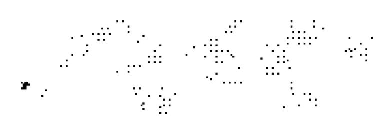
例 4-3　在“合理利用企业利润”层次结构模型（图 4-4）中，相对于评价准则 O 层，应用迭代法求 P 层的元素权重。

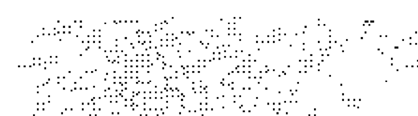
步骤一，任取一标准化向量 $\boldsymbol{w}^{(0)}$，指定一精度要求 $\varepsilon>0(k=0)$。

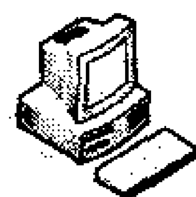
取
$$\boldsymbol{w}^0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon=0.001$$

步骤二，迭代计算。

第一次迭代：$\overline{\boldsymbol{w}}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.511 \\ 3 \\ 1.444 \end{bmatrix}$







$$w^{(1)}=\begin{bmatrix}\dfrac{0.511}{0.511+3+1.444}\\ \dfrac{3}{0.511+3+1.444}\\ \dfrac{1.444}{0.511+3+1.444}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.103\\0.605\\0.291\end{bmatrix}$$

$$|w_i^{(1)}-w_i^{(0)}|>0.001$$

第二次迭代：$\bar{w}^{(2)}=\begin{bmatrix}1&\frac{1}{5}&\frac{1}{3}\\5&1&3\\3&\frac{1}{3}&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.103\\0.605\\0.291\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.321\\1.993\\0.802\end{bmatrix}$

$$w^{(2)}=\begin{bmatrix}\dfrac{0.321}{0.321+1.993+0.802}\\ \dfrac{1.993}{0.321+1.993+0.802}\\ \dfrac{0.802}{0.321+1.993+0.802}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.103\\0.639\\0.257\end{bmatrix}$$

$$|w_i^{(2)}-w_i^{(1)}|>0.001$$

第三次迭代：$\bar{w}^{(3)}=(0.316\quad 1.925\quad 0.779)^T$

$w^{(3)}=(0.105\quad 0.637\quad 0.258)^T$

$|w_i^{(3)}-w_i^{(2)}|>0.001$

第四次迭代：$\bar{w}^{(4)}=(0.318\quad 1.936\quad 0.785)^T$

$w^{(4)}=(0.105\quad 0.637\quad 0.258)^T$

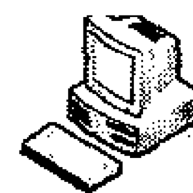
$|w_i^{(4)}-w_i^{(3)}|<0.001$，迭代终止。

$w^{(4)}$即是相对于 O 准则，求得的 P 层元素权重向量。

例 4-4 用和积法求“合理利用企业利润”层次结构模型(图 4-4)中 P 层的元素权重。

步骤一，将 $\boldsymbol{A}$ 的列标准化：$\bar{a}_{ij}=\dfrac{a_{ij}}{\sum a_{kj}}$， 令 $\bar{\boldsymbol{A}}=(\bar{a}_{ij})$

所以：
$$\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{1+5+3}&\dfrac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{5}+1+\frac{1}{3}}&\dfrac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{3}+3+1}\\ \dfrac{5}{1+5+3}&\dfrac{1}{\frac{1}{5}+1+\frac{1}{3}}&\dfrac{3}{\frac{1}{3}+3+1}\\ \dfrac{3}{1+5+3}&\dfrac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{5}+1+\frac{1}{3}}&\dfrac{1}{\frac{1}{3}+3+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.111&0.130&0.077\\0.556&0.652&0.692\\0.333&0.217&0.231\end{bmatrix}$$



步骤二，将 $\bar{A}$ 按行相加：$\bar{M}_i = \sum \bar{a}_{ij}$

所以：$\bar{M} = \begin{bmatrix} 0.111+0.130+0.077 \\ 0.556+0.652+0.692 \\ 0.333+0.217+0.231 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.317 \\ 1.900 \\ 0.781 \end{bmatrix}$

步骤三，对 $\bar{M}$ 标准化：$w_i = \dfrac{\bar{M}_i}{\sum \bar{M}_i}$

所以：$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{0.317}{0.317+1.9+0.781} \\ \dfrac{1.9}{0.317+1.9+0.781} \\ \dfrac{0.781}{0.317+1.9+0.781} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.106 \\ 0.634 \\ 0.261 \end{bmatrix}$

由此求得 P 层元素权重向量 $w^{P/O} = (0.106, 0.634, 0.261)^{\mathrm{T}}$。

3）一致性检验概念

这里的一致性是指各专家给出的判断矩阵一致或指判断者前后判断一致。例如，在计算层次元素权重向量时，如果出现"甲比乙重要，乙比丙重要，丙又比甲重要"的判断结果显然是违反常理的。因此需要对判断矩阵的一致性进行检验。在介绍一致性检验方法之前，先给出几个特殊矩阵的定义。

正互反矩阵定义：满足 $a_{ij}>0, a_{ji}=1/a_{ij}$ 的矩阵 $A=(a_{ij})$ 称为正互反矩阵。

例如：$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$、$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$ 都是正互反矩阵。

一致性矩阵定义：称 A 为一致性矩阵，如果 $A=(a_{ij})$ 是正互反矩阵，且满足

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}, \quad i,j,k = 1,2,\cdots,n$$

例如：$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$ 是一致性矩阵。但 $A = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$ 是非一致性矩阵。

4）一致性检验步骤

下面介绍一致性检验的步骤。

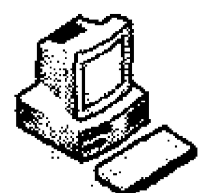
步骤一，求矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}$。$\lambda_{\max}$ 可以用下式计算：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum \frac{(Aw)_i}{w_i} \tag{4-3}$$

式中 $w_i (i=1,2,\cdots,n)$ 就是利用 1）中介绍的方法求出的层次元素权重。

步骤二，计算一致性指标 C. I.（consistency index）：

$$\text{C. I.} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \tag{4-4}$$



式中 n 为判断矩阵的阶数。

步骤三，查平均随机一致性指标 R. I. (random index)值。其中 R. I. 是足够多个根据随机发生的判断矩阵计算的一致性指标的平均值。1—10 阶矩阵的 R. I. 取值见表 4-3。

表 4-3　平均随机一致性指标 R. I. 取值

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I.	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.4	1.45	1.49

步骤四，计算一致性比例 C. R. (consistency ratio)：

$$\text{C. R.} = \frac{\text{C. I.}}{\text{R. I.}} \tag{4-5}$$

当 C. R. <0.1 时认为判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的一致性满意。

注意：(1) 实际应用中只要求检验矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是否存在严重的非一致性。一般而言，C. R. 愈小，判断矩阵的一致性愈好。通常认为 C. R. $\leqslant 0.1$ 时，判断矩阵具有满意的一致性。

(2) 一阶、二阶判断矩阵总是具有一致性，所以不必检验。

5) 一致性检验示例

例 4-5　应用方根法检验“合理利用企业利润”层次结构模型(图 4-4)中相对于 O 准则，P 层的两两比较矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的一致满意性。

步骤一，求矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征根 $\lambda_{\max}$。

由例 4-2，应用方根法求得 P 层元素的权重向量 $\boldsymbol{w}^{P/O}=(0.105, 0.637, 0.258)^{\mathrm{T}}$。

$$\text{因为：}\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}^{P/O}=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/3\\ 5 & 1 & 3\\ 3 & 1/3 & 1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}0.105\\ 0.637\\ 0.258\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.318\\ 1.937\\ 0.785\end{bmatrix}$$

$$\text{所以：}\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum\frac{(\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}^{P/O})_i}{w_i^{P/O}}=\frac{1}{3}\left(\frac{0.318}{0.105}+\frac{1.937}{0.637}+\frac{0.785}{0.258}\right)=3.037$$

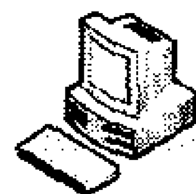
步骤二，计算一致性指标 C. I.：

$$\text{C. I.} = \frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} = \frac{3.037-3}{3-1} = 0.0185$$

步骤三，查平均随机一致性指标 R. I. 值。本例比较矩阵阶数 $n=3$，查表 4-3 得 R. I. $=0.58$。

步骤四，计算一致性比例 C. R.：

$$\text{C. R.} = \frac{\text{C. I.}}{\text{R. I.}} = 0.0319$$



因为 C. R＜0. 1，因此认为“合理利用企业利润”层次结构模型（图 4-4）中相对于 O 准则，P 层元素的比较矩阵一致性满意。

综上步骤二、步骤三计算结果列于表 4-4 中。

表 4-4　相对于 O 准则层，P 层的一致性

O	P_1	P_2	P_3	$\overline{M}_i=\sqrt[3]{P_1P_2P_3}$	$w_i=\dfrac{\overline{M}_i}{\sum\overline{M}_i}$	一致性检验 C. R.
P_1	1	1/5	1/3	0.405	0.105	$\text{C. I.}=\dfrac{\lambda_{\max}-n}{n-1}=\dfrac{3.037-3}{2}=$
P_2	5	1	3	2.466	0.637	0.0185
P_3	3	1/3	1	1	0.258	R. I. ＝0.58
$\sum$				3.871	1	$\text{C. R.}=\dfrac{\text{C. I.}}{\text{R. I.}}=0.0319$

在表 4-4(1)中，C. R. ＝0. 0319，满足 C. R. ＜0. 1，认为相对于 O 层准则，由 P_1，P_2，P_3 构成的比较矩阵一致性检验满意。

相对于 P_1 准则，由 S_1、S_2 构成的比较矩阵一致性满意。

相对于 P_2 准则，由 S_3、S_4 构成的比较矩阵一致性满意。

相对于 P_3 准则，由 S_1、S_2 构成的比较矩阵一致性满意。

同理，可以用迭代法或者和积法求矩阵的最大特征根进而进行一致性检验。

4. 层次总排序及一致性检验

例 4-6　求图 4-4 层次元素总体优先级权重。

步骤一，由方根法求得，相对于 O 层，其 P 层元素排序权重（记为 $\boldsymbol{w}^{P/O}$）为

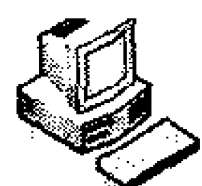
$$\boldsymbol{w}^{P/O}=(0.105,0.637,0.258)^{\mathrm{T}}$$

相对于 P 层的每个准则元素 $P_i(i=1,2,3)$，S 层元素单排序权重（记为 $\boldsymbol{w}^{S/P_i}(i=1,2,3)$）依次为 $\boldsymbol{w}^{S/P_1}=(0.75,0.25)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{w}^{S/P_2}=(0.167,0.833)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{w}^{S/P_3}=(0.667,0.333)^{\mathrm{T}}$。

步骤二，由 P，S 层单排序权重加权平均计算得 S 层元素总体优先级权重见表 4-5。

表 4-5　S 层元素总体优先级

	P_1	P_2	P_3	总体优先级权重
	0.105	0.637	0.258	
S_1	0.75		0.667	0.251
S_2	0.25		0.333	0.112
S_3		0.167		0.106
S_4		0.833		0.531



由表 4-5 可见，相对于准则 P 层，S 层元素排序权重 $\boldsymbol{w}^{S/P}=(0.251,0.112,0.106,0.531)^{\mathrm{T}}$。

步骤三，总体优先级权重一致性检验。

为了层次表述更加清晰，我们把层次单排序一致性检验指标做如下的标记，即相对于 O 层，P 层元素单排序权重为 $\boldsymbol{w}^{P/O}$，一致性检验指标记为 $\mathrm{C.I.}^{P/O}$，$\mathrm{R.I.}^{P/O}$，$\mathrm{C.R.}^{P/O}$。相对于 P 层，S 层元素单排序一致性检验指标记为 $\mathrm{C.I.}^{S/P_i}(i=1,2,3)$，$\mathrm{R.I.}^{S/P_i}(i=1,2,3)$，$\mathrm{C.R.}^{S/P_i}(i=1,2,3)$。则 S 层元素总体优先级一致性检验指标（记为 $\mathrm{C.I.}^{S/P}$，$\mathrm{R.I.}^{S/P}$，$\mathrm{C.R.}^{S/P}$）：

$$\mathrm{C.I.}^{S/P}=(\mathrm{C.I.}^{S/P_1},\mathrm{C.I.}^{S/P_2},\mathrm{C.I.}^{S/P_3})\cdot\boldsymbol{w}^{P/O} \tag{4-6}$$

$$\mathrm{R.I.}^{S/P}=(\mathrm{R.I.}^{S/P_1},\mathrm{R.I.}^{S/P_2},\mathrm{R.I.}^{S/P_3})\cdot\boldsymbol{w}^{P/O} \tag{4-7}$$

$$\mathrm{C.R.}^{S/P}=\frac{\mathrm{C.I.}^{S/P}}{\mathrm{R.I.}^{S/P}} \tag{4-8}$$

由步骤三的计算，相对于 P 层的三个准则元素 $P_i(i=1,2,3)$，S 层元素单排序检验 $\mathrm{C.I.}^{S/P_1}=0$，$\mathrm{C.I.}^{S/P_2}=0$，$\mathrm{C.I.}^{S/P_3}=0$，因此 $\mathrm{C.R.}^{S/P}=0$。即相对于 P 层准则，S 层元素总体优先级一致性满意。

4.5.3 应用 AHP 方法建立系统层次结构模型

上文通过“合理利用企业利润”层次结构模型逐步介绍了层次分析法建模的过程，下面再通过例 4-6 完整地叙述用 AHP 方法构建系统层次结构模型的过程。

例 4-7 基于 AHP 方法的“大学生择业”系统层次结构模型。

大学生的职业选择是一个很宽泛的范畴，既包括了职业价值观、职业理想、个人状况、择业偏好、就业准备等内在因素，也涉及家庭、地区、生活环境、流行观念、就业政策、择业机会等外部因素。毕业生的能力素质与用人单位的要求之间存在着很大的差距，毕业生的就业期望也与社会实际需求之间存在着巨大的反差。下面从大学毕业生的择业角度建立大学生职业要素层次结构模型，以此探索大学生择业要素。

第一步，建立由目标层、准则层、方案层构成的系统层次结构模型。

“就业选择”的层次结构模型见图 4-5。

第二步，构造判断矩阵，计算各层次元素权重。

根据表 4-2，由某毕业生建立各层次成对比较矩阵，并用方根法计算各层次元素相对于准则元素的权重，分别见表 4-6 和表 4-7。

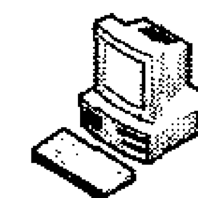


表 4-6　相对于 O 准则层，P 层元素的权重及一致性检验

O	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	W	一致性检验
P_1	1	1	1	4	1	1/2	0.16	$\lambda_{max}=6.605$ $C.I.^{P/O}=0.121$ $R.I.^{P/O}=1.24$ $C.R.^{P/O}=0.0976<0.1$
P_2	1	1	2	4	1	1/2	0.18	
P_3	1	1/2	1	5	3	1/2	0.18	
P_4	1/4	1/4	1/5	1	1/3	1/3	0.05	
P_5	1	1	1/3	3	1	1	0.14	
P_6	2	2	2	3	3	1	0.29	

表 4-7(1)　相对于准则 P_1，S 层元素权重及一致性检验

P_1	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	1/4	1/2	0.14	$C.I.^{S/P_1}=0.01$ $R.I.^{S/P_1}=0.58$ $C.R.^{S/P_1}=0.02<0.1$
S_2	4	1	3	0.62	
S_3	2	1/3	1	0.24	

表 4-7(2)　相对于准则 P_2，S 层元素权重及一致性检验

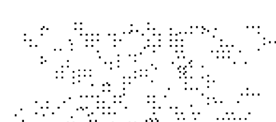
P_2	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	1/4	1/5	0.10	$C.I.^{S/P_2}=0.06$ $R.I.^{S/P_2}=0.58$ $C.R.^{S/P_2}=0.1034$
S_2	4	1	1/2	0.33	
S_3	5	2	1	0.57	

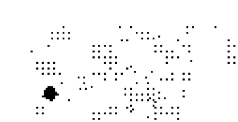
表 4-7(3)　相对于准则 P_3，S 层元素权重及一致性检验

P_3	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	3	1/3	0.32	$C.I.^{S/P_3}=0.28$ $R.I.^{S/P_3}=0.58$ $C.R.^{S/P_3}=0.4827$
S_2	1/3	1	1	0.22	
S_3	3	1	1	0.46	

表 4-7(4)　相对于准则 P_4，S 层元素权重及一致性检验

P_4	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	1/3	5	0.28	$C.I.^{S/P_4}=0.03$ $R.I.^{S/P_4}=0.58$ $C.R.^{S/P_4}=0.0517<0.1$
S_2	3	1	7	0.65	
S_3	1/5	1/7	1	0.07	





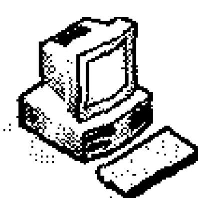


表 4-7(5)　相对于准则 P_5,S 层元素权重及一致性检验

P_5	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	1	7	0.47	$C.I.^{S/P_5}=0.002$ $R.I.^{S/P_5}=0.58$ $C.R.^{S/P_5}=0.0034<0.1$
S_2	1	1	7	0.47	
S_3	1/7	1/7	1	0.06	

表 4-7(6)　相对于准则 P_6,S 层元素权重及一致性检验

P_6	S_1	S_2	S_3	W	一致性检验
S_1	1	7	9	0.77	$C.I.^{S/P_6}=0.11$ $R.I.^{S/P_6}=0.58$ $C.R.^{S/P_6}=0.1896$
S_2	1/7	1	5	0.17	
S_3	1/9	1/5	1	0.06	

第三步,层次单排序及一致性检验。

用方根法求最大特征根。相对于准则 O 层,由第二步求得 P 层元素的两两比较矩阵(仍记为 $\boldsymbol{P}$)的最大特征根为

$$\text{因为：}\boldsymbol{PW}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1/2\\1 & 1 & 2 & 4 & 1 & 1/2\\1 & 1/2 & 1 & 5 & 3 & 1/2\\1/4 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1/3\\1 & 1 & 1/3 & 3 & 1 & 1\\2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.16\\0.18\\0.18\\0.05\\0.14\\0.29\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.005\\1.185\\1.245\\0.315\\0.98\\1.900\end{bmatrix}$$

$$\text{所以：}\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum\frac{(Pw)_i}{w_i}=\frac{1}{6}\times\left(\frac{1.005}{0.16}+\frac{1.185}{0.18}+\frac{1.245}{0.18}+\frac{0.315}{0.05}+\frac{0.98}{0.14}+\frac{1.9}{0.29}\right)$$
$$=6.605$$

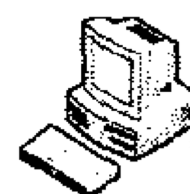
$$\text{所以：}C.I.^{P/O}=\frac{6.605-6}{6-1}=0.121$$

比较矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的阶数 $n=6$,查表 4-3 得 $R.I.^{P/O}=1.24$。则一致性比例指标 $C.R.^{P/O}=0.0976$,满足 $C.R.^{P/O}<0.1$,认为相对于 O 准则层,由 P_1、P_2、P_3、P_4、P_5、P_6 构成的比较矩阵具有满意的一致性。所以,相对于准则 O 层,P 层元素单排序为 $\boldsymbol{w}^{P/O}=(0.16,0.18,0.18,0.05,0.14,0.29)^{\mathrm{T}}$。

同理,相对于准则 P 层,可得到 S 层元素的单排序。这些计算结果都汇总在表 4-6 和表 4-7 中。

第四步,层次总排序及一致性检验。

相对于准则 O,P 层单排序即是该层总排序。



下面求相对于 P 层准则，S 层元素总排序。计算结果见表 4-8。

表 4-8　S 层元素总体优先级

P 层单排序 / S 层单排序		研究课题 P_1	发展前景 P_2	待遇 P_3	同事情况 P_4	地理位置 P_5	单位名气 P_6	总排序 W	一致性检验
		0.16	0.18	0.18	0.05	0.14	0.29		
工作 1	S_1	0.14	0.10	0.32	0.28	0.47	0.77	0.40	
工作 2	S_2	0.62	0.33	0.22	0.65	0.47	0.17	0.34	$C.I.^{S/P}=0.0124$
工作 3	S_3	0.24	0.57	0.46	0.07	0.06	0.26	0.26	$R.I.^{S/P}=0.58$
C. I.		0.01	0.06	0.28	0.03	0.002	0.11		$C.R.^{S/P}=0.0214<0.1$
R. I.		0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58		

由此得工作 1 是该毕业生认为最满意的工作。

整个模型构建结果见图 4-6。

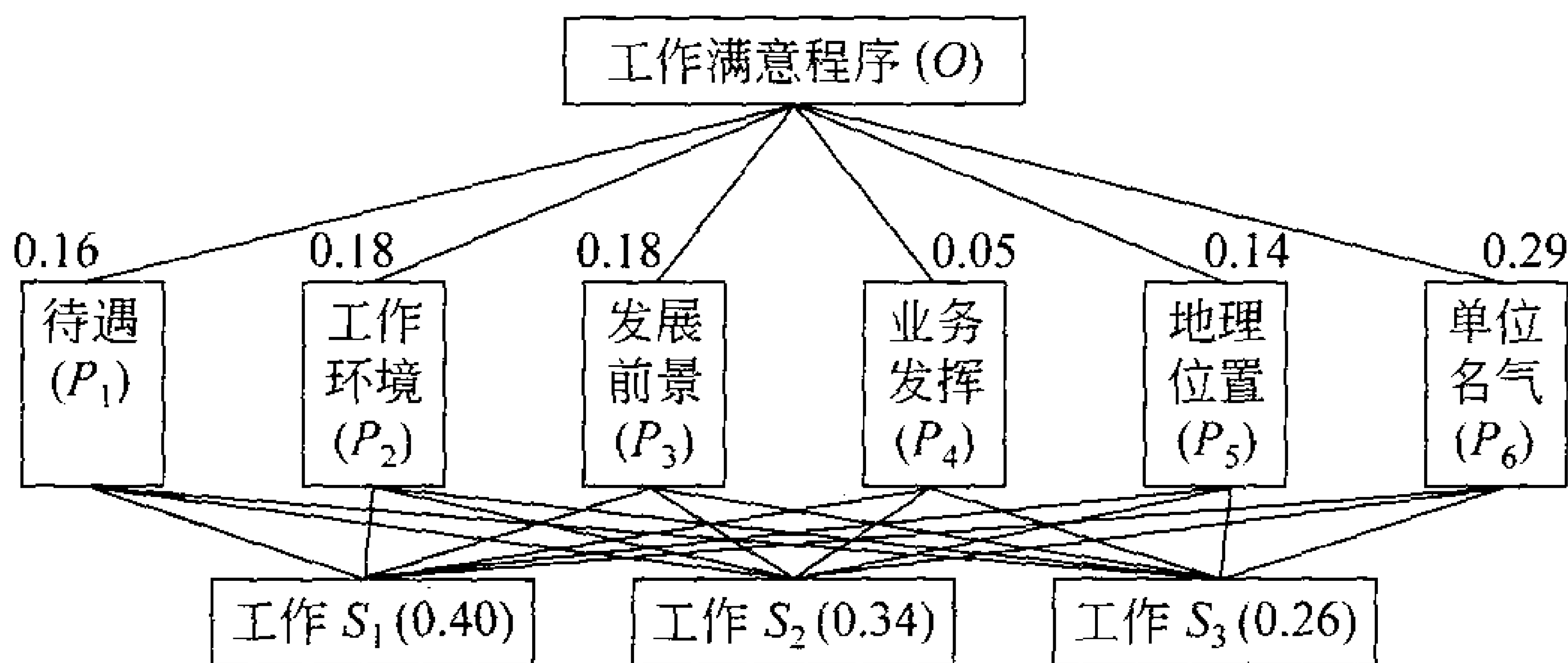


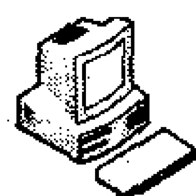
图 4-6　“大学生择业”层次结构模型

注意： 本题有几处 C. R. >0.1，严格意义上应该继续改进。

本章小结

在规划、分析、设计系统时，常常需要定性和定量地了解系统的功能和结构，并对系统的行为进行充分的探讨。但是，这种方法并非总能实现的。因此，针对这类问题，就产生了用数学模型或仿真模型来准确表达系统特征，并能用计算机进行模拟试验的抽象的模型方法。

模型是主体反映客体(即研究对象)、揭示其性质和规律，并且利用和改造客体的手段。系统模型是用于对系统特征的概括描述、模仿，是对研究对象整体或者局部的抽象。好的系统模型应该能够反映出系统的主要特征或本质属性，能够概括系统的共性。



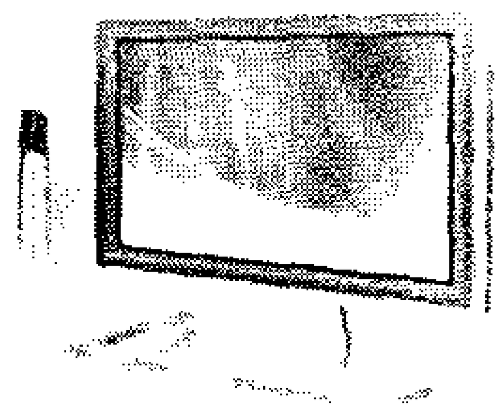
针对不同的系统对象，可以采取不同的方法建造系统模型，其中主要的方法有下面几种：直接分析法(推理法)、数据分析法(统计法)、比拟思考法、德尔菲法。

层次结构分析模型不仅能够构建系统要素的层次结构关系，同时还能够定量地给出，在这个多级递阶结构模型中系统各元素与目标元素之间关系的依赖程度。



思考题

1. 试说明系统建模的不同方法的适用对象和建模思路。
2. 层次分析方法的内涵和基本特征是什么？其适合解决什么样的问题？
3. 试运用层次分析方法进行某实际问题的不同方案的筛选工作，并写出研究报告。



第5章 系统评价

本章关键词

系统评价(system evaluation)　评价方法(evaluation method)

本章要点

系统评价是系统工程霍尔方法论的逻辑第五步"评价决策"。在作出了前述的目标分析、方案汇总等各项工作之后，接下来就是对方案进行科学的评价，供决策者选择使用其中最佳的方案。系统评价是对系统开发提供的各种可行方案，从社会、政治、经济、技术的观点予以综合考虑，在全面权衡利弊得失之后，为系统决策选择最优方案提供科学的依据。因此，系统评价是系统决策的基础，是系统工程中一步重要的工作。本章指出了构建系统评价指标体系的原则和方法，给出了重要且应用广泛的几个系统综合评价方法，为系统择优方案提供了决策依据。

5.1 系统评价的基本概念

5.1.1 系统评价的含义与意义

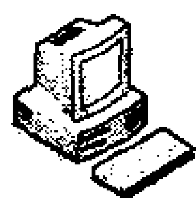
系统评价是按预定的系统目标，在系统调查和可行性研究的基础上，对研究对象的功能进行数量化描述，对研究对象的结构进行间接描述。

所谓评价是指对各方案实现系统目标(集)优劣程度的一种判定。

系统评价作为一种对客观事物进行评定、明确评价对象应用价值的处理方法，已经在社会经济发展、工程技术研究、企业经营管理等各个方面得到了广泛应用。例如体操运动员的一整套动作的评价、设备的先进性评价、教师的教学水平评价、学生的综合素质的评价、经济发展水平评价、综合国力评价等。系统评价是系统工程中的一步重要工作，是系统分析中的一个重要环节。

5.1.2 系统评价的思想和原则

系统评价的思想是利用系统工程的观点和信息论、控制论等方法对系统整体进行综



合评价。任何系统评价方法都有其评价的目标(指标)和内容,而这些目标和内容的提出以及问题的确定又都取决于系统评价的思想和原则。

系统评价是一项技术工作,评价是决策的依据,但决策是领导者的责任,并且决策并不是单纯的技术性工作,常常伴有一些心理素质等不可见的因素。

当系统为单目标时,评价工作比较容易进行,但是当系统为多目标时评价工作就困难得多。为了搞好评价工作,在系统评价之前需要进行目标(指标)分析,需要解决:①将各项指标数量化;②将所有指标归一化;③将评价指标有序化;④保证方案的客观性、可比性等问题。这些在前述的目标确定中已作了较为详细的叙述。

5.2 系统评价指标体系

既然评价是对各方案实现系统目标(集)的优劣程度的一种判定,那么这种判定的依据是什么呢?例如,可以根据教学方法、教学内容、教学手段、教书育人等评价指标来判定教师的教学水平。教学方法、教学内容、教学手段、教书育人等评价指标就是我们对教师的教学质量进行评价的依据。对于多目标系统的评价,一方面要把它分解成若干个子系统,分别建立模型,然后应用系统分析的方法求得各个指标的最优解;另一方面还要把这些工作综合起来得到一个完整的方案,再对该完整方案作出正确的评价。这就需要用一整套评价指标即评价指标体系来作为系统评价的依据。因此,评价指标或者评价指标体系是评价方案实现系统目标的评价依据。

系统评价指标体系是由若干个单项评价指标组成的整体。对于所要评价的系统,必须建立能对照和衡量各个方案的统一尺度,即建立评价指标体系。同时我们也要认清,评价指标体系的建立也是系统评价工作的难点。

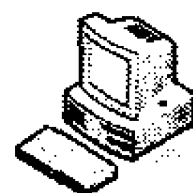
5.2.1 系统评价指标体系建立的原则

如何确立评价指标体系是系统评价工作必须首先解决的一个难题。每一个系统性问题所涉及的研究对象的评价指标至少有几十种,而精确的量化并不等于评价的准确,因此应选取尽量少的指标反映最主要的信息。同时,每项指标都应该可以量化且具有独立性和通用性。所以在建立指标系统过程中,应遵循以下原则:

(1) 整体性原则。建立的指标体系应该能从系统目标所涉及的各个不同侧面反映系统的现有特征和状况,能够体现系统的未来变化和发展趋势。但切忌不是越广泛越好,因为评价指标体系越大,对系统的评价就越困难。

(2) 客观性原则。要尽量保证评价指标体系的客观公正,保证评价资料以及数据来源的全面性、可靠性、准确性和可行性。

(3) 科学性原则:不管是指标的选择与指标权重的确定,还是定量指标和定性指标



的协调，又或者是数据的选取与计算，都必须以科学理论为依据。

（4）实用性原则：评价工作的意义在于选择科学合理的方案以解决遇到的系统性问题，为决策者更好地指导实际工作提供科学的决策依据。因此，应尽量选取日常统计指标或容易获得的指标，以便直观、简便地说明问题。

5.2.2　系统评价指标体系的构成

系统评价指标体系是由若干个单项评价指标组成的整体，各个指标是研究对象某些方面的客观属性变量。各属性变量是关于研究目的的框架结构，它由系统的性质、目标要求、特殊问题以及问题的规模、重要性等确定。评价指标一般包括以下几个方面。

（1）政策性指标：包括政府的方针、政策、法令、规划等。

（2）技术性指标：包括产品的性能、寿命、可靠性等，工程的设备、设施、运输等。

（3）经济性指标：包括方案的成本、利润、资金、周期等。

（4）社会性指标：包括社会的福利、发展、就业、环境等。

（5）资源性指标：包括工程的物资、人员、能源、土地等。

（6）时间性指标：包括工程的进度、时间等。

注意：在选择评价指标的过程中，应注意以下几个问题。

（1）指标的分类和数量问题。选择的指标范围宽、数量多，不同方案间的差异表现就明显，这有利于判断和评价，但同时也增加了对方案本质特性的评价难度。

（2）指标的提出和确定问题。指标的提出要广泛征求意见，反复交换信息。指标的确定要归纳综合，必要时要进行统计处理。

（3）指标间的相互关系问题。单项指标间要尽量相互独立，若有交叉则必须明确划分和规定该指标的属类。

5.2.3　系统评价指标体系的构建方法

第 2 章介绍的解释结构模型（ISM）方法，第 3 章介绍的分层分解法、目标手段考察法，第 4 章介绍的层次结构分析（AHP）法等都可以用来作为系统评价指标体系的构建方法。另外，还可以结合应用主成分分析法、灰色关联度法、回归分析方法等，以及这些方法的组合，更加精确地构建出评价指标体系。

例如，用分层分解法得到“开发满意的计算机”和“教师的教学水平”评价指标体系，分别见图 5-1 和图 5-2。

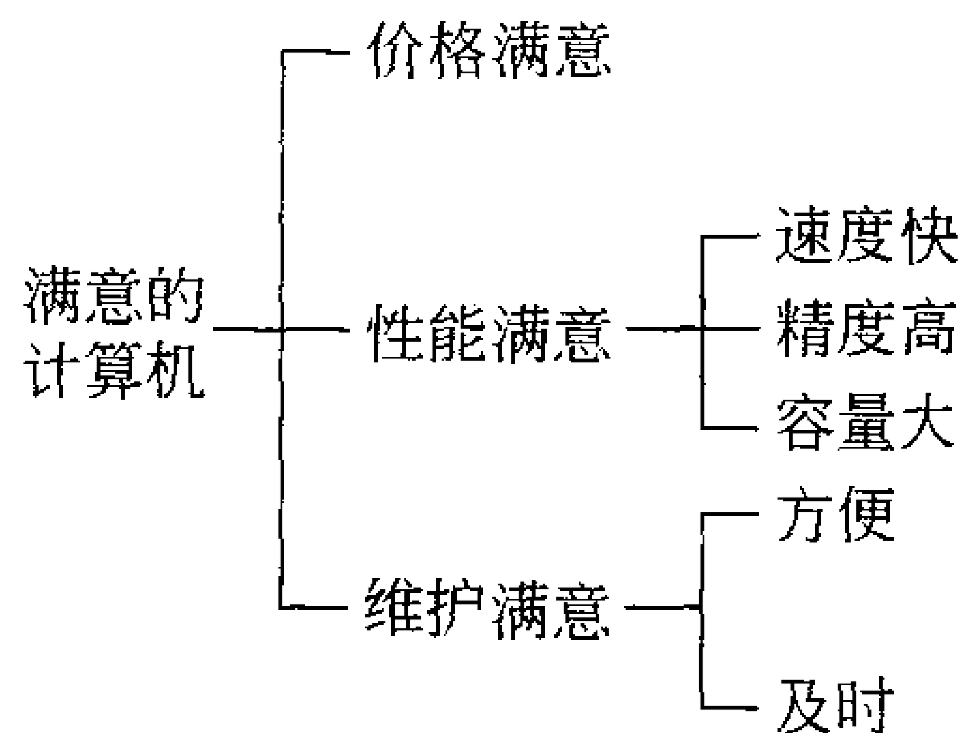
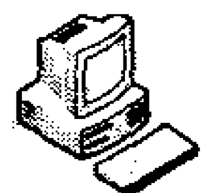


图 5-1　“开发满意的计算机”评价指标体系



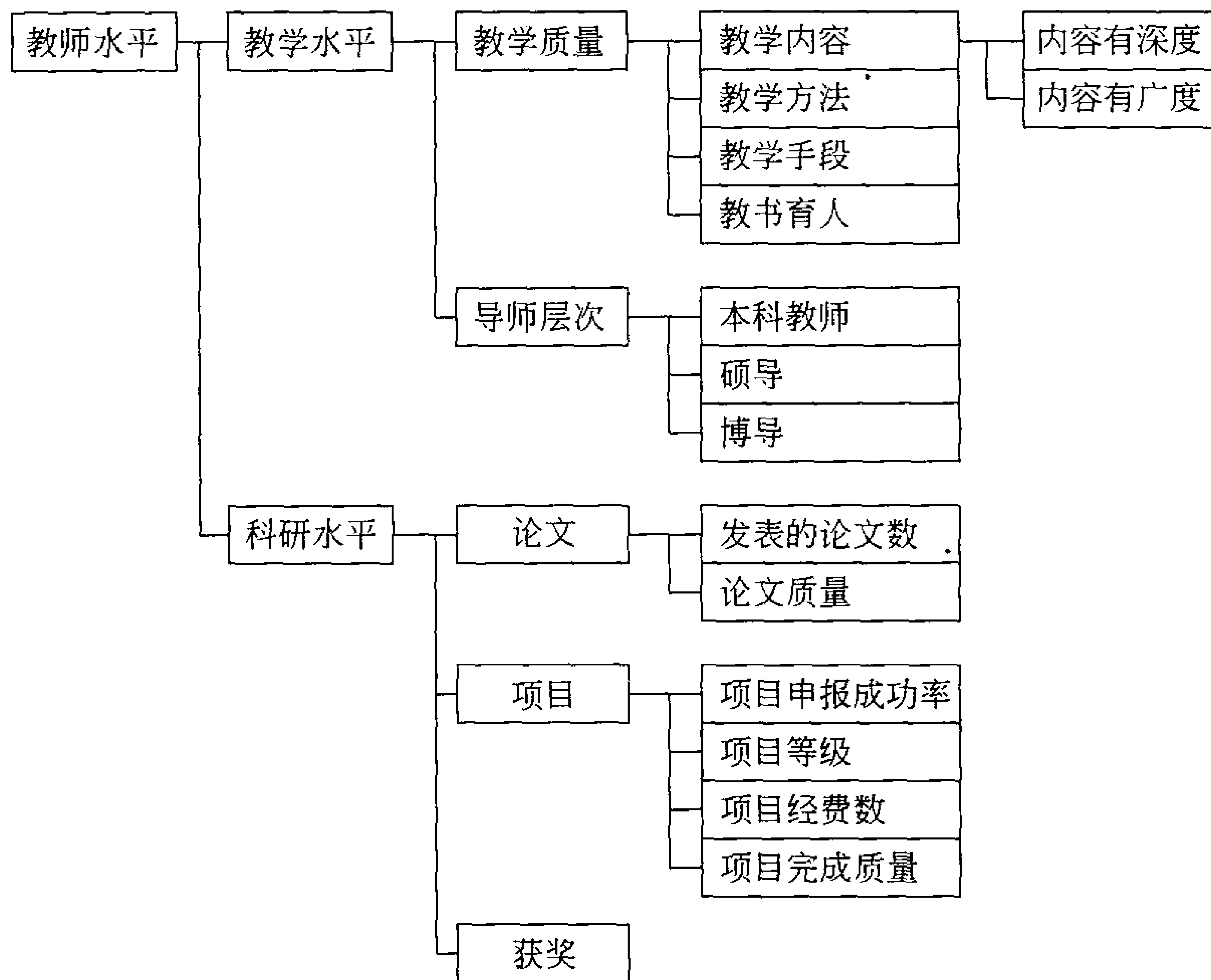


图 5-2 “教师的教学水平”评价指标体系

5.3 系统评价的一般步骤

系统评价的步骤是评价工作有效进行的保证。它一般包括以下几个步骤。

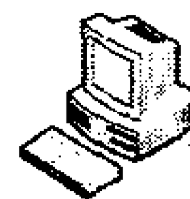
(1) 明确系统目的,熟悉系统方案。为了进行科学的评价,必须反复调查、了解系统的评价目的,进一步分析和讨论已经考虑到的所有系统方案,并简要说明各个评价方案。

(2) 分析系统要素,确定评价项目。根据系统的评价目的收集有关的资料和数据,对组成系统的各个要素及性能特征进行全面的分析,找出进行系统评价的项目。

(3) 确定评价指标体系。选用不同指标进行对比和评价是决定方案取舍的标志。因此,评价指标体系必须科学、客观、全面,要综合系统的目的和特点来考虑各种主要因素。指标体系可以通过充分的调查、分析,在大量研究资料的基础上建立起来,应反映出所要解决问题的各项目标要求。

(4) 制定量化的评价标准。对系统方案进行量化评价,能够方便地对方案进行比较、择优。因此,要对所确定的指标进行定量化处理,以确定各个单项和分类指标权重,分析评价各个指标的实现程度。

每一个具体指标可能是几个指标的综合,这是由评价系统的特性和评价指标体系的结构所决定的。由于各指标的评价尺度不一样,不同的指标可能很难在一起比较。因此,



必须将指标体系中的指标规范化，制定出统一的评价准则，根据指标所反映要素的状况确定各指标的结构和权重。

(5) 确定评价方法。评价方法根据对象的具体要求不同而有所不同。总的来说，要按系统目标、系统分析结果与效果的测定方法、评价准则等确定。

(6) 综合评价。综合评价就是利用模型和各种资料，从系统的整体观点出发综合分析问题，对比各种可行方案，权衡各个方案的利弊得失，选择适当且可能实现的优化方案，即由综合各分类指标值求得评价总值。

5.4　系统评价方法

在系统工程中，从认识评价问题到给予决策者评价决策方案，系统评价方法的程序及实施过程可以用图 5-3 形象地表示。

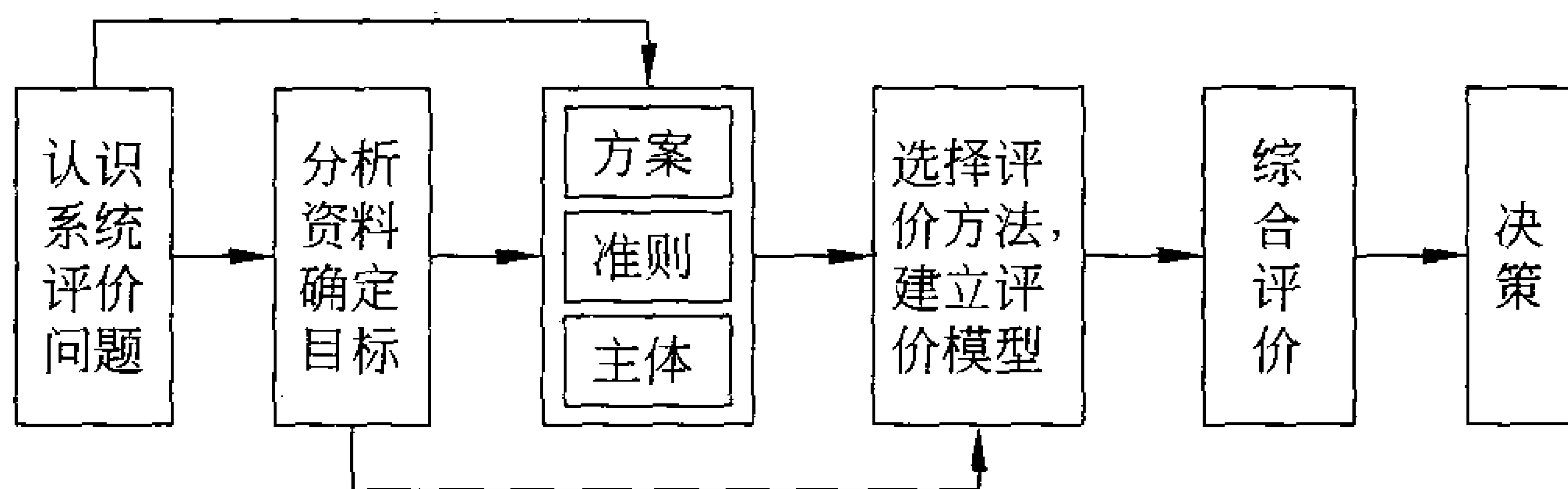


图 5-3　系统评价方法的实施过程

由于评价对象涉及的因素较多、复杂程度较高，因此，要求评价按照严格、精确的方法进行还有不少困难。目前，主要还是依靠定性与定量相结合、客观统计资料与主观描述资料并重的手段。

5.4.1　经验评价方法

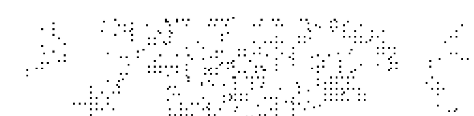
1. 专家评价法

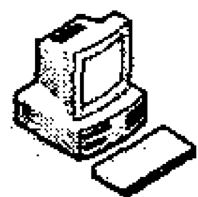
专家评价法就是邀请有关专家，采取会议形式或非会议形式，由他们对系统对象的各个方面给出评分，并按一定的权数综合出个人的评价值，然后采用平均的方法综合各个专家意见，最后确定系统总体的平均得分及等级。该方法的运用过程与一般评价过程基本一致，专家个人的评价总有可能存在一定的偏差，通过平均的方法就可以消除偶然性误差的影响，显示专家评价的一般水平。尤其是在专家人数众多的情况下，采用平均数指标能够较好地集中大家的智慧，较好地评价出系统的总体水平。

专家评价方法的步骤如下。

(1) 制定评分表：包括判定目标和全部被选方案。

(2) 选定 n 个专家(尽可能多)，按指定的目标给每个方案打分。





(3) 计算方案的得分：$d_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}d_{ki}, i=1,2,\cdots,p$。其中 d_i 代表第 i 个方案的得分值，d_{ki} 表示第 k 个专家给予第 i 个方案的评分值，n 为参加评分的专家数，p 为方案数。

(4) 根据方案得分多少给出方案的优劣排序。

例 5-1 按“企业形象”目标评定 4 个企业，方案评价见表 5-1。

表 5-1 “企业形象”专家评价表

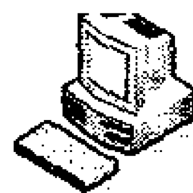
专家		1	2	3	4
1		好	好	中	差
2		中	好	好	中
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
10		差	中	中	好
小记	好	4 个	7 个	2 个	1 个
	中	4 个	2 个	5 个	4 个
	差	2 个	1 个	3 个	5 个
得分		4×3 4×2 2×1	7×3 2×2 1×1	2×3 5×2 3×1	1×3 4×2 5×1
总得分		22	26	19	16
平均得分		2.2	2.6	1.9	1.6
排序		2	1	3	4

由表 5-1 可知，方案 2 是 10 个专家的经验相对一致的最优方案。即企业 2 的形象最好。

专家评价法的优点有两点：一是把定性问题定量化，既便于横向比较，又便于动态比较，具有可操作性；二是有利于集中大家的智慧，消除偶然性因素带来的偏差。但是该方法也存在一定的局限性：一是合适的专家难寻；二是评价的主观性较强，专家选择不同，评价结论也会发生差异。用平均值对其进行估计存在偏差的可能性，尤其是存在平均谬误的可能性，即各项目得分经平均后出现了几乎相同的现象，而实际上各项目之间存在较大差异。当然，如果专家数量足够多，代表具有足够的广泛性，这种偏差出现的可能性会减小。

注意：(1) 模糊评分时可采用 3,5,10,100 等分制，也可采用 1 分制(1 分制满分为 1，否则为小数或 0)。如例 5-1 就是采用 3 分制选定 10 位专家按“企业形象”目标评定 4 个方案汇总结果。

(2) 专家评价法主要是定性的，缺少定量的因素，受主观因素的影响较大。而主观方法因受到人为因素的影响，往往会夸大和降低某些指标的作用，导致排序结果不能完全真实地反映事物间的现实关系。所以，在系统分析评价过程中，往往运用定量评价方法。



2. 两两比较法

常言道，没有比较就没有鉴别。两两比较方法就是将所有被评价的方案两两之间进行成对比较，再归一化所有专家的比较结果，最终筛选出最佳的方案。

两两比较法的步骤如下。

(1) 由每个专家根据目标将方案两两比较，相对重要的方案记 1 分，相对不重要的方案记 0 分，自身不做比较记为“/”；

比较规则：如果方案 i 与方案 j 一样优劣，则 $d_{ij}=d_{ji}=0.5$；

如果方案 i 优于方案 j，则 $d_{ij}>d_{ji}$；

$$d_{ij}+d_{ji}=1;\quad i、j=1,2,\cdots,p。$$

(2) 统计汇总得总分：

列相加的结果为

$$\sum_{j=1}^{p} d_{ij},\quad i=1,2,\cdots,p$$

行列相加的结果为

$$\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} d_{ij}$$

(3) 第 k 个专家对第 i 个方案的功能评价系数为

$$\Phi_{ki}=\frac{\sum_{j=1}^{p} d_{ij}}{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} d_{ij}},\quad i=1,2,\cdots,p$$

(4) 将 n 个专家评分汇总：

$$\mu_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\Phi_{ki},\quad i=1,2,\cdots,p$$

例 5-2 有两位专家对例 5-1 的 4 个企业形象用两两比较法打分，见表 5-2。

表 5-2(a) “企业形象”两两比较专家 1 评定表

专家 1

企 业	企 业				总得分	平均得分
	1	2	3	4		
1	—	0.7	0.4	0.5	1.6	0.267
2	0.3	—	0.7	0.5	1.5	0.250
3	0.6	0.3	—	1	1.9	0.317
4	0.5	0.5	0	—	1.0	0.167

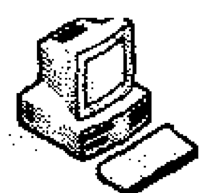


表 5-2(b) "企业形象"两两比较专家 2 评定表

专家 2

企 业	企 业				总得分	平均得分
	1	2	3	4		
1	—	0.5	0.6	0.7	1.8	0.300
2	0.5	—	0.7	0.8	2.0	0.333
3	0.4	0.3	—	0.5	1.2	0.200
4	0.3	0.2	0.5	—	1.0	0.167

则两位专家对四个方案的评价总分为

$$u_1 = \frac{(0.267 + 0.300)}{2} = 0.2835$$

$$u_2 = \frac{(0.250 + 0.333)}{2} = 0.2915$$

$$u_3 = \frac{(0.317 + 0.200)}{2} = 0.2585$$

$$u_4 = \frac{(0.167 + 0.167)}{2} = 0.1670$$

根据 4 个方案的评价得分排序：$u_2 > u_1 > u_3 > u_4$

即两位专家相对一致认为方案 2 是最优方案，即企业 2 的形象最好。

3. 连环比例法

连环比例法又称为比较淘汰法，是一种确定得分系数或加权系数的方法。对于多指标的评价或者多方案的选择，连环比例法比两两比较法更快、更省时间。此方法可以分成三个步骤进行。

(1) 排定方案 $1,2,\cdots,i\cdots,p$。

(2) 将第 p 个方案定为 1。用 d 表示方案的重要度，

当方案 i 与方案 $i+1$ 一样优劣时，则 $d_i=1$；

当方案 i 比方案 $i+1$ 优 x 倍时，则 $d_i=x$；

$d_p=1$。

(3) 统计各方案的得分及平均得分，根据得分高低评价出最优方案。

例 5-3 有一位专家用连环比例法对例 5-1 的 4 个企业的形象进行打分评价，见表 5-3。

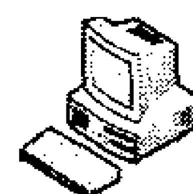


表 5-3　“企业形象”连环比例法专家评定表

企　业	重要度比值	得　分	平均得分
1	0.8	2.64	0.300
2	1.5	3.30	0.333
3	2.2	2.20	0.200
4	1.0	1.00	0.167
$\sum$		9.14	1

4 个企业形象的评价总分排序为

“企业 2”优于“企业 1”优于“企业 3”优于“企业 4”

该专家认为企业 2 的形象最好。

注意：(1) 经验评价方法还可以用来作为求权重的简单方法。例如应用专家评价法给出例 5-1 中 4 个方案的权重分别为 0.265 1，0.313 2，0.228 9，0.192 8，应用两两比较法给出例 5-2 中 4 个方案的权重依次为 0.283 5，0.291 5，0.258 5，0.167 0，应用连环比例法给出例 5-3 中 4 个方案的权重依次为 0.289，0.361，0.241，0.109。

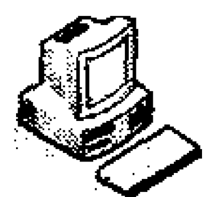
(2) 专家评价法、两两比较法、连环比例法这三种方法都需要寻找经验丰富的专家进行打分，所以这些方法称为经验评价法。经验评价法评价的精确度依赖于专家的经验丰富程度，还取决于专家的责任心。

4. 经验评价方法示例

在例 4-1 中，我们直接给出了三位竞聘学生干部的能力分值，然后利用已获得的三位竞聘学生的能力分值进行干部最优配置。这里利用专家评分法对学生甲的能力作出评价，分值如表 5-4 所示。

表 5-4　学生甲承担工作能力分值表

专　家	承担干部的能力分			$\sum$
	文艺部	宣传部	外联部	
1	40	40	20	100
2	30	40	30	100
3	20	30	50	100
$\sum$	90	110	100	300
平均	30	37	33	



即学生甲承担“文艺部”、“宣传部”、“外联部”这三项工作，其能力用分值表示分别为30、37分和33分。

同理，也可以对学生乙、丙的工作能力进行评价。

5.4.2 价值分析方法

价值分析法也称为关联矩阵法。当系统具有一个或多个目标时，可以用系统的价值来衡量系统目标实现的程度。如果若干个方案由同一组量纲不同的指标构成，这时也可以使用价值分析法对方案进行评价选优。

设有价值分析初始表5-5。

表5-5 价值分析关联矩阵表

方　案	指　标			
	指标1	指标2	…	指标 n
1	R_{11}	R_{12}	…	R_{1n}
2	R_{21}	R_{22}	…	R_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	R_{m1}	R_{m2}	…	R_{mn}

价值分析法步骤如下：

(1) 确定各指标的权数向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$，$\sum w_i = 1$ 。

(2) 给出每一方案评价指标的值([0,1]或[0,10] 等分值法)，即指标的归一化处理。

设第 i 个方案的第 j 个指标值为 R_{ij}，第 i 个方案对第 j 个指标的评价值记为 v_{ij}(分值)，则指标的归一化可以按下式计算处理：

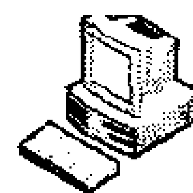
$$v_{ij}=\begin{cases}\dfrac{R_{ij}-\min\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}}{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}-\min\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}}, & R_{ij}\text{ 是递增型(优)指标}\\[2ex] 1-\dfrac{R_{ij}-\min\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}}{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant n}-\min\limits_{1\leqslant j\leqslant n}}\text{ 或}\dfrac{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}-R_{ij}}{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}-\min\limits_{1\leqslant j\leqslant n}R_{ij}}, & R_{ij}\text{ 是递减型(劣)指标}\end{cases}\tag{5-1}$$

注：也可以按其他公式计算处理。

例如“人均GDP”、“住房面积”都是递增型指标(也称为优指标)，“资金回收期”、“成本”都是递减型指标(也称为劣指标)。

(3) 求出每一方案的综合评价值 V_i：$V_i=\sum\limits_{j=1}^{n}w_iv_{ij}$

例5-4 随着某单位的发展扩大，单位原地址因面积太小已不能满足发展的需要。



现拟增购一所房子。将价格、使用面积、与原单位距离、环境状况4个指标作为增购房子的衡量指标。经多方筛选，现有3处房子可供选择，这4个指标的权重及3处房子的基本情况如表5-6所示。现用[0,1]价值分值法求各方案的综合评价值。

表5-6　房屋购买信息表

方　案	指　标			
	价格/万元 $W_1=0.2882$	面积/m^2 $W_2=0.2313$	距离/km $W_3=0.1344$	环境 $W_4=0.3461$
1	150	500	10	7
2	90	280	20	11
3	110	350	12	9

（1）指标集权重向量 $\boldsymbol{W}=(0.2882,0.2313,0.1344,0.3461)$。

（2）4个指标中的"面积"、"环境"为递增型指标；"价格"、"距离"为递减型指标。应用公式(5-1)可以对它们进行归一化处理，计算结果列于表5-7。

表5-7　方案评价分值表

方　案	指　标				V_i
	($W_1=0.2882$)	($W_2=0.2313$)	($W_3=0.1344$)	($W_4=0.3461$)	
1	0	1	1	0	0.3657
2	1	0	0	1	0.6343
3	0.667	0.318	0.800	0.5	0.5462

（3）计算各方案的综合评价值：加权平均求得各方案的综合评价值分别为0.3657，0.6343和0.5462。

评价结果显示，方案2是该单位购房首选方案；其次是方案3；最后是方案1。

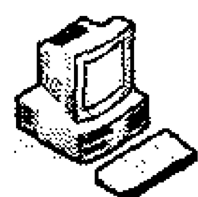
5.4.3　模糊综合评价方法

模糊综合评价法是运用模糊数学方法对受多种因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素评价方法。其特点是评价结果不是绝对地肯定或否定，而是以一个模糊集合来表示。模糊数学已在许多领域得到广泛的应用。在评价、决策、预测、控制等方面的论著和文献数不胜数。运用模糊数学方法对人、事、物等多因素系统进行全面的、定量的评价，是对多方案进行综合评判的系统评价技术。

1. 模糊概念

任何概念都有确切的内涵和外延。《文学理论》中对概念的内涵和外延定义为：内涵





是指该概念所反映的对象的本质属性的总和；外延是指具有该概念所反映的本质属性的一切对象。例如“交通工具”是“自行车”的外延。“钢铁厂”的外延就是所有生产钢铁的工厂。外延不分明的概念被称为模糊概念。模糊译自英文 fuzzy，指“不分明的”、“边界不清的”。例如“老年人”，因为“老”是一个逐渐变化的过程，无法确切地划出一条年龄界限表示年老，因此“老”实际上是一个模糊概念。经济学中的“恶性通货膨胀”、“消费超前”、“资金沉淀”等也都是模糊概念。事实上，模糊概念处处存在，冷与热、好与坏、厚与薄、快与慢、轻与重、高与低、美与丑、强与弱、软与硬、平滑与粗糙、开放与封闭等都是无法界定边界的，都属于模糊概念。

2. 模糊指标的量化

上面提到的“老年人”是一个集合，我们先称之为模糊集，为了以示不同，用记号$\underset{\sim}{A}$表示，即$\underset{\sim}{A}=\{$老年人$\}$。这个集合与经典数学中提到的集合显然有明显的不同，现在有一个元素 a，能否简单地判断出元素 a 是否模糊集合$\underset{\sim}{A}$中的元素？显然我们不能简单地认为要么 $a\in\underset{\sim}{A}$，要么 $a\notin\underset{\sim}{A}$。例如，$a$ 表示一位 59 岁的人，能否说 $a\in\underset{\sim}{A}$或者 $a\notin\underset{\sim}{A}$？这个问题用经典数学的非 0 即 1 来描述显然有问题。这时，就可以用称之为隶属程度值 $\mu_{\underset{\sim}{A}}(a)=x$ 来表示，即用元素 a 隶属于模糊集合$\underset{\sim}{A}$的程度 x（$x\in[0,1]$或 $x\in[0,10]$，或 $x\in[0,100]$等取值）来描述。如前面提到的元素 a(59 岁的人)隶属于老年人集合$\underset{\sim}{A}$的程度 $\mu_{\underset{\sim}{A}}(a)=0.59$，即表示这个人属于年老的同时还有 0.41 非老的因素。

3. 模糊综合评价的基本步骤

下面给出模糊综合评价的基本步骤。

第一步，确定评价对象。$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_k\}$。其中，$v_1,v_2,\cdots,v_k$ 分别表示 k 个评价对象，V 表示由 k 个评价对象构成的集合。

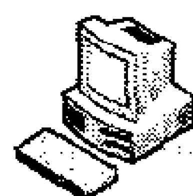
确定评价要素(标准)。$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$。其中，$x_1,x_2,\cdots,x_m$分别表示 m 个评价指标，X 表示由 m 个评价指标构成的集合。

确定评价的模糊评语。$\underset{\sim}{A}=\{\underset{\sim}{A}_1,\underset{\sim}{A}_2,\cdots,\underset{\sim}{A}_n\}$。其中，$\underset{\sim}{A}_1,\underset{\sim}{A}_2,\cdots,\underset{\sim}{A}_n$ 分别表示 n 种评语等级，$\underset{\sim}{A}$表示由 n 种评语等级构成的模糊集合。

第二步，确定评价要素权重。$W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$，$\sum w_i=1$。其中，$w_1,w_2,\cdots,w_m$ 分别表示 m 个评价要素的权重，W 表示由 m 个评价指标权重构成的向量。

第三步，建立隶属函数。设 $X\rightarrow\underset{\sim}{A}$的模糊关系为 $\underset{\sim}{R}$，则 $\underset{\sim}{R}=\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)$ 称为隶属函数(也称为梯速度函数)。

由隶属函数建立隶属度矩阵。模糊关系 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$：$X\cdot\underset{\sim}{A}\rightarrow[0,1]$可以用一个 $m\cdot n$ 阶矩阵表示，即



$$\underset{\sim}{\boldsymbol{R}} = (r_{ij}) = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \tag{5-2}$$

式中,隶属函数值 $r_{ij}=\mu_{\underset{\sim}{A}_j}(x_i)$ 表示从第 i 个评价指标 x_i 着眼属于第 j 种模糊等级 $\underset{\sim}{A}_j$ 的可能程度,$r_{ij}\in[0,1]$。就某一方案对第 i 个指标 x_i 的等级评定结果记作隶属度向量 $\underset{\sim}{R}_i$ $(i=1,2,\cdots,m)$,则 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}_i=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{in})$,且 $\sum_{j=1}^{n} r_{ij} = 1$。

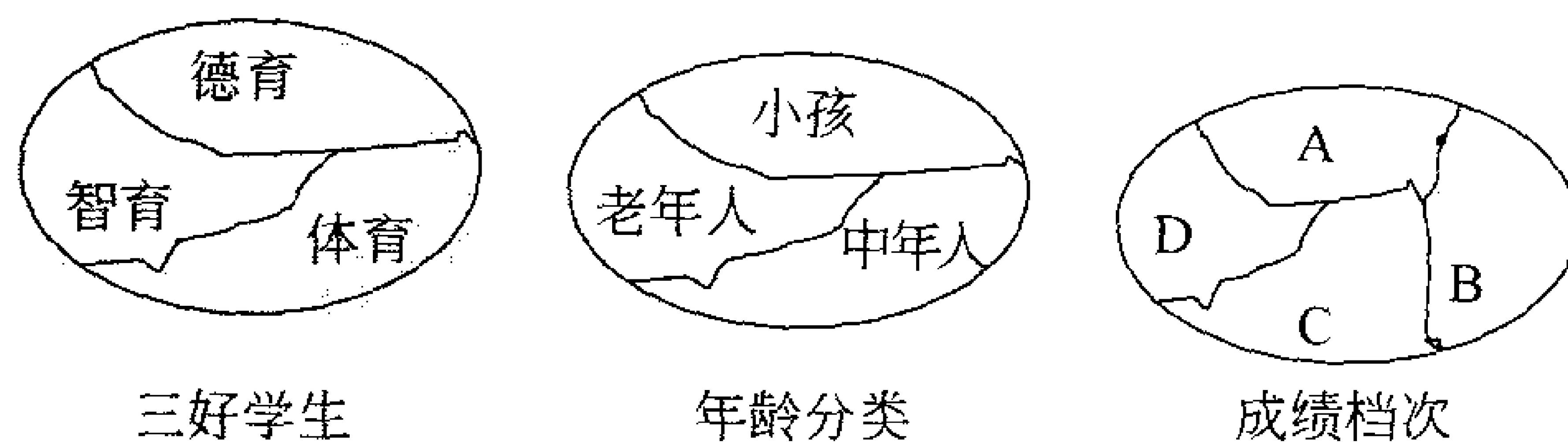
第四步,矩阵的合成运算和归一化处理。$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$, $\sum s_i=1$。其中模糊关系合成运算符"∘"一般有三种取法。记合成运算"∘"为 $M(\cdot\ ,\cdot)$,则 $M(\cdot\ ,\cdot)$ 可以取 $M(\wedge,\vee)$,其中"∧"为取两个数中的小者运算,"∨"为取两个数中的大者运算,也称为"主因数决定型模型运算";$M(\cdot\ ,\cdot)$ 可以取 $M(\times,\vee)$,其中"×"为两个数的乘法运算,"∨"为取两个数中的大者运算,也称为"主因数突出型模型运算";$M(\cdot\ ,\cdot)$ 可以取 $M(\times,\oplus)$,其中"×"为两个数的乘法运算,"⊕"表示有界和,如 $a\oplus b=\min\{a+b,1\}$,这种运算也称为"加权平均型模型运算"。

第五步,根据最大隶属度原则作出综合评价结果。最大隶属度原则为

$$\mu_{\underset{\sim}{A}}(x) = \max\{\mu_{\underset{\sim}{A}_1}(x),\cdots,\mu_{\underset{\sim}{A}_n}(x)\} \tag{5-3}$$

即最大隶属度 $r_i^*=\max(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{in})$,$i=1,2,\cdots,m$。

注意:(1) 第一步中 n 种评语等级(都是模糊集)构成一个完整的集合。例如:



如果完整的集合用数量1来表示,则 n 种评语等级的分值和为1。

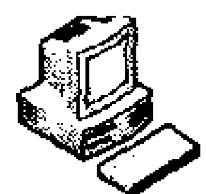
(2) 第二步中确定评价要素权重可以应用前面学过的方法,例如经验评价法给出。

(3) 第三步建立隶属函数是模糊综合评价方法的关键步骤。关于隶属函数可参考有关的模糊数学。

4. 模糊综合评价

对于简单的几个呈平行关系的评价指标,模糊综合评价相对容易许多。单层评价指标如图5-4所示。

例5-5 某种新产品有三种不同的设计方案(设为方案Ⅰ、方案Ⅱ、方案Ⅲ),现根据"质量"、"成本"、"实用性"三个标准对这三个方案进行优、良、中、劣的评价。



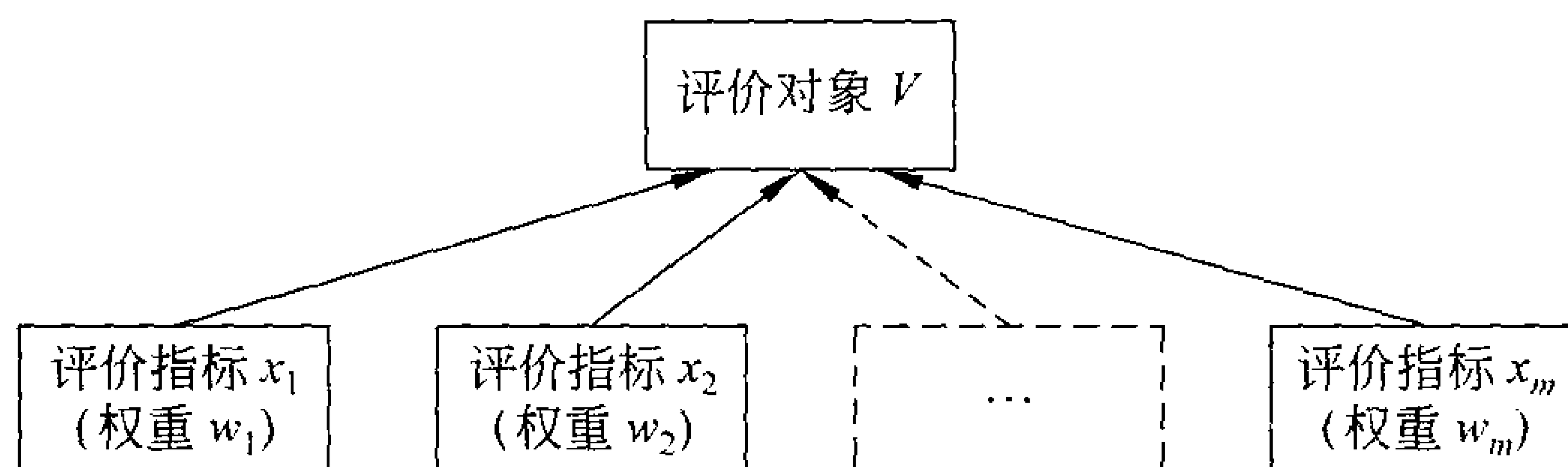


图 5-4 单层评价指标示图

首先对方案Ⅰ进行模糊综合评价。

第一步，评价对象集：V={方案Ⅰ，方案Ⅱ，方案Ⅲ}。

评价标准集：X={质量，成本，实用性}={X_1，X_2，X_3}。

评语等级集：$\underset{\sim}{A}$={优，良，中，劣}={$\underset{\sim}{A}_1$，$\underset{\sim}{A}_2$，$\underset{\sim}{A}_3$，$\underset{\sim}{A}_4$}。

第二步，三个评价标准指标权重设为 W={0.2，0.5，0.3}。

第三步，建立隶属函数。设 10 名专家打分(经验评价法)情况如表 5-8 所示。

表 5-8 10 名专家打分结果表

方案Ⅰ	优	良	中	劣	$\sum$
质量	6	3	1	0	10
成本	5	3	1	1	10
实用性	3	4	2	1	10

统计表 5-8 得隶属度矩阵：

$$\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=\begin{bmatrix}0.6 & 0.3 & 0.1 & 0\\0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1\\0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1\end{bmatrix}$$

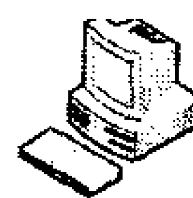
第四步，求模糊合成运算(取主因数决定型模型运算 M(∧，∨))：

$$[0.2,\quad 0.5,\quad 0.3]\circ\begin{bmatrix}0.6 & 0.3 & 0.1 & 0\\0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1\\0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1\end{bmatrix}$$

$$=[0.5,0.3,0.2,0.1]$$

归一化：$\left[\frac{0.5}{1.1},\frac{0.3}{1.1},\frac{0.2}{1.1},\frac{0.1}{1.1}\right]=[0.46,0.27,0.18,0.09]$

第五步，根据最大隶属度原则得综合评价结果。新产品方案Ⅰ属于“优”的程度为 46%，属于“良”的程度为 27%，属于“中”的程度为 18%，属于“劣”的程度为 9%。根据最大隶属度原则，方案Ⅰ的评价结果为“优”。



同理可以对方案Ⅱ和方案Ⅲ进行模糊综合评价。

注意：如果模糊综合评价的第四步出现两个隶属程度一样，比如模糊合成运算使用 $M(\wedge,\vee)$，则评价结果为 $S=(0.2,0.3,0.3,0.2)\circ\begin{bmatrix}0.4 & 0.5 & 0.1 & 0\\0.3 & 0.3 & 0.4 & 0\\0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2\\0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1\end{bmatrix}=(0.3,0.3,0.3,0.2)$，此时最大隶属度原则失效。这时可以重新选择合成运算，例如合成运算使用 $M(\times,\vee)$，则 $S=(0.2,0.3,0.3,0.2)\circ\begin{bmatrix}0.4 & 0.5 & 0.1 & 0\\0.3 & 0.3 & 0.4 & 0\\0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2\\0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1\end{bmatrix}=(0.32,0.36,0.24,0.08)$。此时根据最大隶属度原则，模糊综合评价结果为“良”。当然，也可以更改评价标准指标权重值尝试或可以多请一些专家再打分重新计算隶属度矩阵，等等。总之，修正以后再用最大隶属度原则给出模糊综合评价结果。

例 5-6　对三种品牌(雅戈尔、杉杉、培罗蒙)西服进行评价。

第一步，评价对象：$V=\{$雅戈尔，杉杉，培罗蒙$\}=\{V_1,V_2,V_3\}$；

西服的评价标准为：$X=\{$款式，料质，做工，价格$\}=\{X_1,X_2,X_3,X_4\}$；

评语等级集合：$\underset{\sim}{A}=\{$很好，好，一般，差$\}=\{\underset{\sim}{A}_1,\underset{\sim}{A}_2,\underset{\sim}{A}_3,\underset{\sim}{A}_4\}$

第二步，确定评价指标权重：$W=\{W_1,W_2,W_3,W_4\}=\{0.2,0.3,0.3,0.2\}$

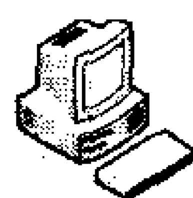
第三步，建立隶属函数：10 名专家评价整理结果见表 5-9。

表 5-9　10 名专家打分结果表

杉杉西服	$\underset{\sim}{A}_1$	$\underset{\sim}{A}_2$	$\underset{\sim}{A}_3$	$\underset{\sim}{A}_4$	$\sum$
款式 X_1	5	4	1	0	10
料质 X_2	5	3	2	0	10
做工 X_3	6	4	0	0	10
价格 X_4	2	5	2	1	10

统计表 5-9 得隶属度矩阵：$\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=(r_{ij})=\begin{pmatrix}0.5 & 0.4 & 0.1 & 0\\0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\\0.6 & 0.4 & 0 & 0\\0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1\end{pmatrix}$

第四步，做合成运算(取 $M(\wedge,\vee)$)并归一化：



$$S = (0.2,0.3,0.3,0.2) \circ \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} = (0.3,0.3,0.2,0.1)$$

此时，最大隶属度原则失效。改用$M(\times, \vee)$运算：

$$S = (0.2,0.3,0.3,0.2) \circ \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} = (0.18,0.12,0.06,0.02)$$

归一化：$S=(0.18/0.38,0.12/0.38,0.06/0.38,0.02/0.38)=(0.47,0.32,0.16,0.05)$

第五步，根据最大隶属度原则，杉杉西服的综合评价结果是“很好”(属于“很好”的程度为47%)。

同理，可以对其他两种品牌的西服进行评价。

注意：如果有两个方案的评价结果一样，例如在例5-5中，方案Ⅰ的合成运算结果为[0.46,0.27,0.18,0.09]，假设方案Ⅱ的合成运算结果为[0.40,0.35,0.20,0.05]，方案Ⅰ和方案Ⅱ的最大隶属度结果都是“优”，如何决策出一个最佳方案？可以用综合评价值排序方法决策出最佳方案。

例如，记“优”为85分，“良”为70分，“中”为65分，“劣”为55分。

则方案Ⅰ的综合评分值为$0.46\times85+0.27\times70+0.18\times65+0.09\times55=39.1+18.9+11.7+4.95=74.65$(分)。

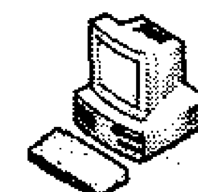
方案Ⅱ的综合评分值为$0.40\times85+0.35\times70+0.20\times65+0.05\times55=34+24.5+13+2.75=74.25$(分)。

根据综合评价值排序，选择方案Ⅰ作为最佳设计方案。

例5-7 对甲、乙两位教师的教学质量综合评价见表5-10及表5-11。

表5-10 教师甲的教学质量模糊综合评价表

评价指标(权重)	评价等级(分值)			
	高($\underset{\sim}{A}_1$)(100分)	较高($\underset{\sim}{A}_2$)(85分)	一般($\underset{\sim}{A}_3$)(70分)	较差($\underset{\sim}{A}_4$)(55分)
X_1：教学计划及教学内容(0.10)	9 / 0.36	14 / 0.56	2 / 0.08	0 / 0.00
X_2：教材及参考资料情况(0.10)	3 / 0.12	14 / 0.56	7 / 0.28	1 / 0.04



续表

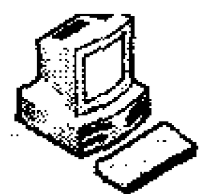
评价指标(权重)		评价等级(分值)			
		高($\underset{\sim}{A}_1$)(100 分)	较高($\underset{\sim}{A}_2$)(85 分)	一般($\underset{\sim}{A}_3$)(70 分)	较差($\underset{\sim}{A}_4$)(55 分)
X_3：教学态度及责任心(0.15)		5 / 0.20	15 / 0.60	5 / 0.20	0 / 0.00
X_4：教师的讲解能力(0.10)		1 / 0.04	10 / 0.40	11 / 0.44	3 / 0.12
X_5：课堂教学形式的多样化(0.10)		2 / 0.08	11 / 0.44	12 / 0.48	0 / 0.00
X_6：理论联系实际及教学案例使用(0.10)		5 / 0.20	14 / 0.56	6 / 0.24	0 / 0.00
X_7：辅助教学环节及考核(0.10)		4 / 0.16	6 / 0.24	13 / 0.52	2 / 0.08
X_8：教学改革与创新情况(0.10)		3 / 0.12	8 / 0.32	12 / 0.48	2 / 0.08
X_9：从本课程学习中所获得的收益(0.15)		5 / 0.20	12 / 0.48	6 / 0.24	2 / 0.08
综合评价结果	综合隶属度	0.189 5	0.473 7	0.273 7	0.063 1
	综合得分	81.84			

合成运算取 $M(\wedge,\vee)$，则模糊合成运算结果为

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=(0.10,0.10,0.15,0.10,0.10,0.10,0.10,0.10,0.15)\circ$$

$$\begin{bmatrix}0.36 & 0.56 & 0.08 & 0.00\\ 0.12 & 0.56 & 0.28 & 0.04\\ 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0.00\\ 0.04 & 0.40 & 0.44 & 0.12\\ 0.08 & 0.44 & 0.48 & 0.00\\ 0.20 & 0.56 & 0.24 & 0.00\\ 0.16 & 0.24 & 0.52 & 0.08\\ 0.12 & 0.32 & 0.48 & 0.08\\ 0.20 & 0.48 & 0.24 & 0.08\end{bmatrix}=(0.15,0.15,0.15,0.10)$$

可见，合成运算取 $M(\wedge,\vee)$ 失效！换合成运算 $M(\wedge,\vee)$ 为 $M(\times,\vee)$，则



$$S=W\circ \underset{\sim}{R}=(0.10, 0.10, 0.15, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.15)\circ\begin{bmatrix}0.36 & 0.56 & 0.08 & 0.00\\0.12 & 0.56 & 0.28 & 0.04\\0.20 & 0.60 & 0.20 & 0.00\\0.04 & 0.40 & 0.44 & 0.12\\0.08 & 0.44 & 0.48 & 0.00\\0.20 & 0.56 & 0.24 & 0.00\\0.16 & 0.24 & 0.52 & 0.08\\0.12 & 0.32 & 0.48 & 0.08\\0.20 & 0.48 & 0.24 & 0.00\end{bmatrix}=(0.036, 0.090, 0.052, 0.012)$$

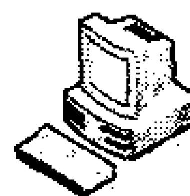
归一化：$S=(0.1895, 0.4737, 0.2737, 0.0631)$

该教师的综合评价得分为

$$0.1895\times100+0.4737\times85+0.2737\times70+0.0631\times55$$
$$=18.95+40.2645+19.159+3.4705=81.844$$

表 5-11　教师乙的教学质量模糊综合评价表

评价指标(权重)		评价等级(分值) 高($\underset{\sim}{A_1}$)(100分)	较高($\underset{\sim}{A_2}$)(85分)	一般($\underset{\sim}{A_3}$)(70分)	较差($\underset{\sim}{A_4}$)(55分)
X_1：教学计划及教学内容(0.10)		10 / 0.4	10 / 0.4	5 / 0.2	0 / 0.00
X_2：教材及参考资料情况(0.10)		5 / 0.2	12 / 0.48	6 / 0.24	2 / 0.08
X_3：教学态度及责任心(0.15)		5 / 0.20	7 / 0.28	10 / 0.4	3 / 0.12
X_4：教师的讲解能力(0.10)		5 / 0.20	10 / 0.40	7 / 0.28	3 / 0.12
X_5：课堂教学形式的多样化(0.10)		2 / 0.08	11 / 0.44	12 / 0.48	0 / 0.00
X_6：理论联系实际及教学案例使用(0.10)		7 / 0.28	10 / 0.40	8 / 0.32	0 / 0.00
X_7：辅助教学环节及考核(0.10)		4 / 0.16	6 / 0.24	13 / 0.52	2 / 0.08
X_8：教学改革与创新情况(0.10)		3 / 0.12	7 / 0.28	12 / 0.48	3 / 0.12
X_9：从本课程学习中所获得的收益(0.15)		5 / 0.20	12 / 0.48	6 / 0.24	2 / 0.08
综合评价结果	综合隶属度	0.2105	0.3789	0.3158	0.0947
	综合得分	80.573			



合成运算 $M(\wedge,\vee)$ 为 $M(\times,\vee)$，则

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=(0.10,\ 0.10,\ 0.15,\ 0.10,\ 0.10,\ 0.10,\ 0.10,\ 0.10,\ 0.15)\circ\begin{bmatrix}0.40 & 0.40 & 0.20 & 0.00\\0.20 & 0.48 & 0.24 & 0.08\\0.20 & 0.28 & 0.40 & 0.12\\0.20 & 0.40 & 0.28 & 0.12\\0.08 & 0.44 & 0.48 & 0.00\\0.28 & 0.40 & 0.32 & 0.00\\0.16 & 0.24 & 0.52 & 0.08\\0.12 & 0.28 & 0.48 & 0.12\\0.20 & 0.48 & 0.24 & 0.08\end{bmatrix}=(0.04,0.072,0.06,0.018)$$

归一化：$\boldsymbol{S}=(0.2105,\ 0.3789,0.3158,0.0947)$

该教师的综合评价得分为

$$0.2105\times100+0.3789\times85+0.3158\times70+0.0947\times55=80.573$$

两位教师综合评价排序：教师甲的教学质量优于教师乙。

当评价标准指标过多时，如果仍然采用单层模糊综合评价会造成评价矩阵过大，加大了运算难度。并且，单层评价指标容易造成指标的信息相互影响而丢失或弱化。应用层次分析等方法将这些评价指标层次化，实行多级递阶模糊综合评价会使得评价过程清晰、简单。多层评价指标如图 5-5 所示。

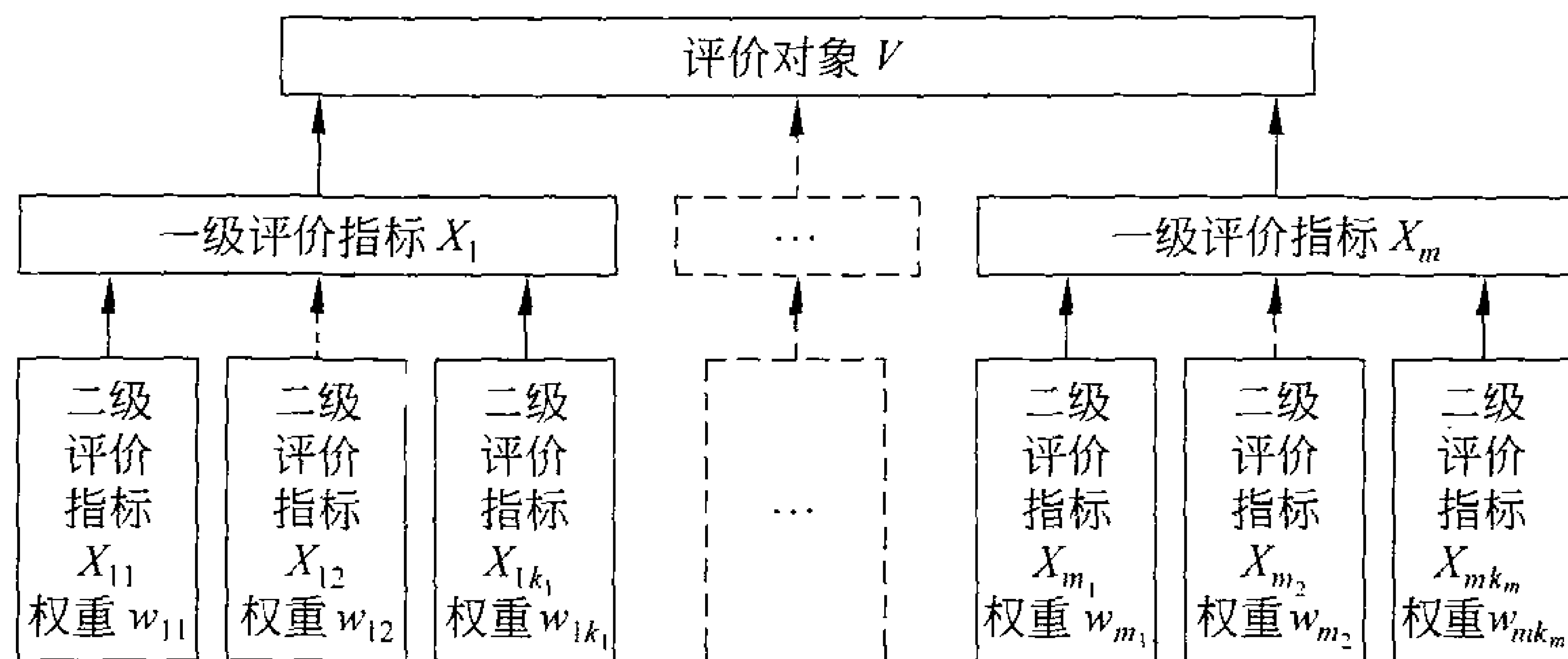


图 5-5　多层评价指标示图

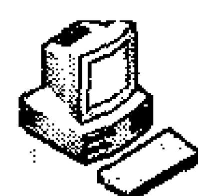
例如，对双肩挑教师的综合素质评价，评价指标体系构成如图 5-6 所示。

例 5-8　对某双肩挑教师的综合素质按图 5-6 所示的评价指标进行评价。

(1) 求第三层对第二层的模糊综合评价。

第一步，评价对象：被评教师的管理能力 X_1 和教学水平 X_2。

评价指标：$X_1=\{$处理问题能力，协作能力，表达能力，政策水平$\}=\{X_{11},X_{12},$



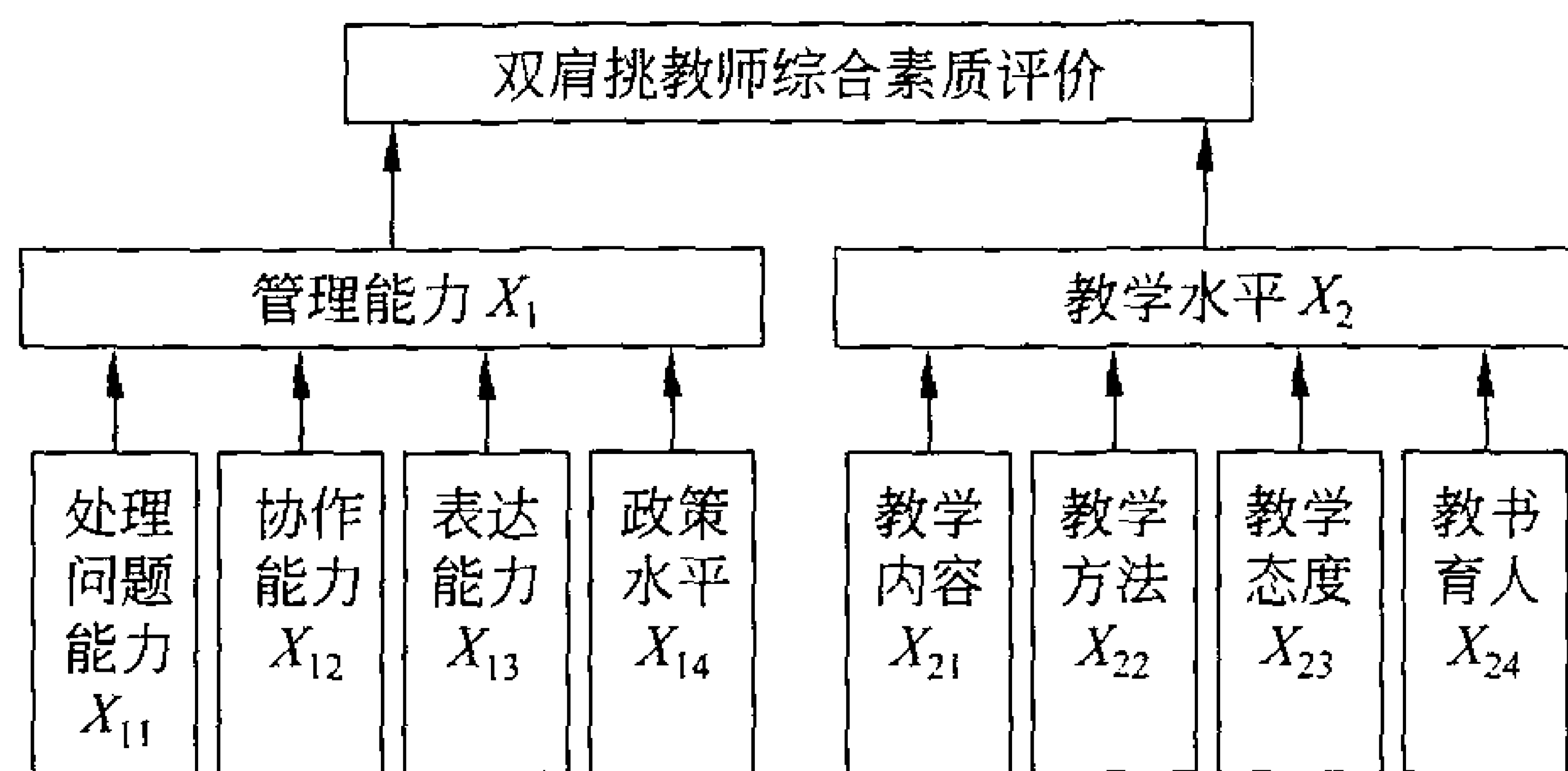


图 5-6　双肩挑教师评价指标体系示图

$X_{13}, X_{14}\}$

X_2={教学内容，教学方法，教学手段，教书育人}$=\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}\}$

模糊评价等级：$\underset{\sim}{A}$={优秀,良好,合格,不合格}$=\{\underset{\sim}{A}_1, \underset{\sim}{A}_2, \underset{\sim}{A}_3, \underset{\sim}{A}_4\}$。

第二步，评价指标权重：假设已有 $W_{X_1}=\{0.26,0.25,0.07,0.42\}$，$W_{X_2}=\{0.35,0.15,0.25,0.25\}$。

第三步，由该校领导、管理层、教师、学生等组成评判组，得到评价矩阵：

$$\boldsymbol{R}_{X_1}=\begin{bmatrix}0.5 & 0.3 & 0 & 0.2\\0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.2\\0 & 0.7 & 0.3 & 0\\0.6 & 0.1 & 0 & 0.3\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{R}_{X_2}=\begin{bmatrix}0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1\\1 & 0 & 0 & 0\\0.4 & 0.5 & 0.1 & 0\\0.4 & 0.6 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

第四步，合成运算(取 $M(\wedge,\vee)$)并归一化：

$\boldsymbol{W}_{X_1}\circ\boldsymbol{R}_{X_1}=(0.42,0.26,0.2,0.3)$，　归一化：$\boldsymbol{S}_{X_1}=(0.36,0.22,0.17,0.25)$

$\boldsymbol{W}_{X_2}\circ\boldsymbol{R}_{X_2}=(0.3,0.35,0.1,0.1)$，　归一化：$\boldsymbol{S}_{X_2}=(0.35,0.41,0.12,0.12)$

(2) 求第二层对第一层的模糊综合评价。

第一步，评价对象：被评教师的综合素质

评价指标：X={管理能力,教学水平}$=\{X_1, X_2\}$

模糊评价等级：$\underset{\sim}{A}$={优秀,良好,合格,不合格}$=\{\underset{\sim}{A}_1, \underset{\sim}{A}_2, \underset{\sim}{A}_3, \underset{\sim}{A}_4\}$

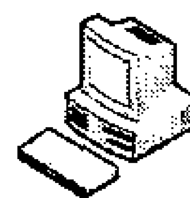
第二步，评价指标权重：假设已有 $W=\{0.7,0.3\}$。

第三步，由(1)的第四步及评价指标层次级的关系(见图 5-6)得到隶属度矩阵：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}S_{X_1}\\S_{X_2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.36 & 0.22 & 0.17 & 0.25\\0.35 & 0.41 & 0.12 & 0.12\end{bmatrix}$$

第四步，合成运算(取 $M(\wedge,\vee)$)并归一化：$\boldsymbol{S}=\{0.33,0.28,0.16,0.23\}$

第五步，根据最大隶属度原则，该双肩挑教师的综合评价结果为“优秀”。



5.4.4　因子分析方法

系统分析与系统决策的进程可划分为四个阶段：一是对系统进行描述性分析；二是对系统进行解析性分析；三是对系统进行预测性研究；四是进行系统决策。因子分析方法属于描述性分析，它能够保证在数据信息损失最小的前提下，从大规模的原始数据群中将重要的信息迅速提取出来，将高位的数据集合进行降维处理，准确地揭示出系统中的因子结构，从而使人们尽可能充分和全面地认识该系统，大大提高决策者的洞察能力和分析效率。

因子分析方法在统计学中称做因子分析，作为探索系统内部运动规律的重要工具之一，目前已经被广泛地应用到经济学、社会学、管理科学等各个领域，并均取得了显著成效。

1. 因子分析的含义和作用

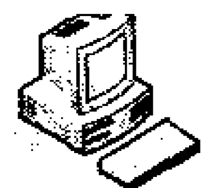
因子分析是通过变量(或样品)的相关系数矩阵(或样品的相似系数矩阵)内部结构的研究，找出能控制所有变量(或样品)的少数几个随机变量来描述多个变量(或样品)之间的相关(或相似)关系。也就是把观测变量分类，将相关性较高的——联系比较紧密的、包含重复信息较多的变量分在同一类中，降低不同类的变量之间的相关性，那么每一类变量实际就代表了一个本质因子或一个基本结构。因子分析法就是寻找系统中这种不可观测的因子或结构的方法，其实质就是在存在相关关系的变量之间，探讨是否存在不能直接观察，但对观测变量的变化起支配作用的、不可观测的潜在因素。主要是寻找潜在的、起支配作用的因素，以便将多个变量综合为少数几个因子，最终用较少的综合指标分别综合存在于各个变量中的各类信息，对原始变量进行分门别类的综合评价。

2. 因子分析模型的形式

因子分析不是对原始变量的重新组合，而是对原始变量进行分解，分解为公共因子与特殊因子两部分。在因子分析过程中，可以将每个公共因子表示为变量的线性组合，进而用变量的观测值来估计各个因子的值(即因子得分)。原始观测变量 x_i 与潜在因素 z_i 之间的关系可由下式表示：

$$\begin{cases} x_1 = b_{11}z_1 + b_{12}z_2 + \cdots + b_{1m}z_m + e_1 \\ x_2 = b_{21}z_1 + b_{22}z_2 + \cdots + b_{2m}z_m + e_2 \\ \quad\vdots \\ x_m = b_{m1}z_1 + b_{m2}z_2 + \cdots + b_{mm}z_m + e_m \end{cases} \tag{5-4}$$

式中，$x_1,\cdots,x_m$ 为原始观测变量，$z_1,\cdots,z_m$ 为潜在共性因素，$e_1,\cdots,e_m$ 为潜在个性(特殊)因素，且共性因素与潜在个性因素相互独立。



3. 因子分析模型的特征

因子分析模型具有如下几个特征。

(1) 因子分析模型中的公共因子包含原始变量的绝大部分信息。

(2) 因子分析模型中的公共因子是不可观测的潜在变量。

(3) 因子分析模型中的公共因子个数是未知的,是需要估计的。

(4) 正交因子分析模型中的公共因子之间是相互独立的。

4. 因子分析模型中的解释统计量

在因子分析模型的建立与分析过程中,需要计算与解释的统计量主要有以下几个。

(1) 因子载荷:反映某个公共因子对某观测变量的影响程度。

因子载荷用来表征公共因子与原有指标之间的关联程度,因子载荷值越高,表明该因子包含的该指标的信息量越多。

(2) 共性方差:用某个公共因子占总方差的百分比说明共性因素对观测变量总体的作用大小。

(3) 因子得分:用观测变量表示共性因素的数值。

因子得分是各个样本在公共因子上的投影值或坐标值,是将原始的全部变量信息集中到几个公共因子上。在进行更深入的定量分析时,可以把样本的因子得分当做初始变量进行进一步的分析。

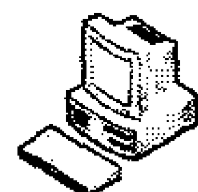
(4) 因子旋转:初始共性因素进行坐标变换获得新的共性因素,并重新分配因子载荷以便容易命名和解释共性因素的实际意义。

为了使因子旋转后的结果达到更易于解释的目的,应使旋转后的因子负荷矩阵尽可能具有简单结构:每一列上的负荷大部分应是很小的,且尽可能接近于0;每一行中尽可能只有少数几个,最好只有一个较大的负荷值;每两列中大负荷和小负荷的排列模式应当不同。

因子分析法由于是以原始变量组成的每个主因子的方差贡献率作为权重来构造综合评价函数,所以使得评价结果具有很强的客观合理性。

从提取公共因子的方法,即估计因子载荷矩阵的角度看,因子分析主要分为以下几种:主成分分析、主因子分析、α因子分析、未加权最小二乘法、映象因子分析、广义最小二乘法和最大似然法。

在因子分析中,主成分分析方法对总体的分布情况没有什么假定,其他方法一般要求总体服从某特定分布规律,如最大似然法要求总体X服从p维正态分布;在计算过程中,其他方法不能像主成分分析法那样在计算因子载荷时可以一次成功,如主因子法往往需要经过多次尝试才能得到因子载荷矩阵;只有用主成分分析法求解因子载荷时可以选择



与变量个数相等的因子变量个数，其他方法都必须要因子变量个数小于原始变量个数。因此在通常情况下，主要采用主成分分析方法。

5.4.5　主成分分析方法

主成分分析法具有理论和实践的简洁性、所得结果的客观性等特点，并且其降维的思想与多指标评价有序化的要求非常接近，所以近年来该方法被广泛地应用于社会、经济、管理等众多领域中，逐渐成为独具特色的多指标评价技术，并成为最常用的排序方法之一。

1. 主成分分析方法的基本思路

在研究多因素问题时，每个指标都在不同程度上描述和反映了问题某方面的信息，但指标之间往往存在一定的相关性，所得统计数据反映的信息在一定程度上有所重叠。此外，因素太多会增加计算量和分析问题的复杂性，难以客观地反映被评价对象的相对地位。既然多因素问题涉及的多指标之间存在一定的相关性，那么必然有起支配作用的共同因素。人们自然希望在进行定量分析的过程中找到这些共同因素，使得设计的指标较少，而得到的信息量又较多。

主成分分析方法利用降维的思想和信息浓缩的技术，以较少的主成分综合代替原来较多的评价指标，使综合指标为原来变量指标的线性组合，并使这些主成分能够尽可能地反映原来指标的信息，且保持彼此之间的相互独立，使得我们在研究复杂问题时容易抓住主要矛盾。

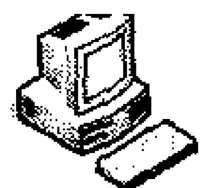
利用主成分分析方法进行评价时包含了两个层次的线性合成：第一层次，将原始指标通过恰当的线性组合而成主成分，按累计方差贡献率不低于某个值的原则确定前几个主成分；第二层次，确定各主成分以后，以各自的方差贡献率为权重，通过线性加权求和得到各个样本的评价值。

下面举例说明主成分分析方法。

例 5-9　测量 n 个儿童的身高和体重见表 5-12，得到身高和体重两个变量之间的关系如散点图 5-7。

表 5-12　身高、体重数据表

观测量	身高 H	体重 W
1	h_1	w_1
2	h_2	w_2
⋮	⋮	⋮
n	h_n	w_n



从图 5-7 中可以看出，散点基本分布在 P_1 附近，且与 P_2 垂直。即 P_1 与 P_2 彼此不相关；n 个点的差异主要表现在 P_1 方向上，而在 P_2 方向上差异很小。因此，可用 P_1 这一个指标代替原来的两个变量 H,W 来研究 n 个观测对象的差异。

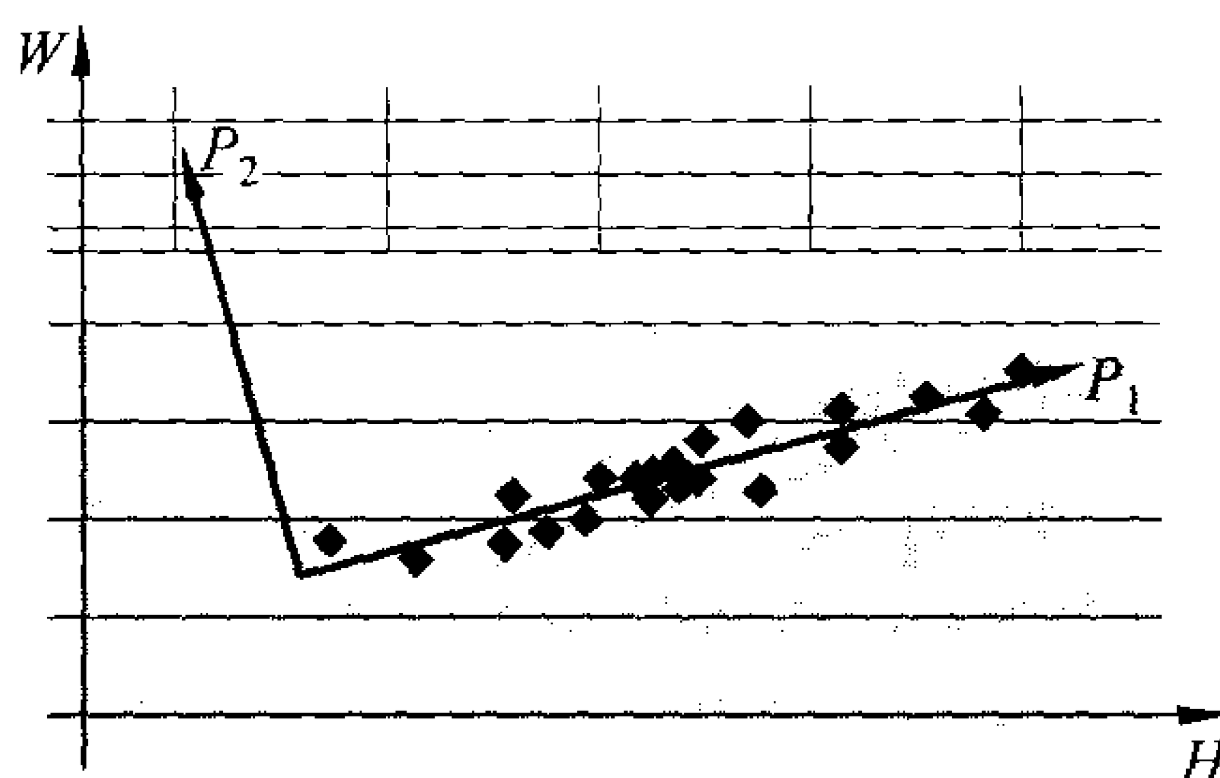


图 5-7　身高、体重散点图

新变量 P_1,P_2 与原变量 H,W 的关系：

$$\begin{cases} P_1 = a_{11}H + a_{12}W \\ P_2 = a_{21}H + a_{22}W \end{cases} \tag{5-5}$$

统计学上称 P_1 为 H,W 的第一主成分，P_2 为 H,W 的第二主成分。这种方法称为主成分分析方法。

2. 主成分分析模型形式

对一组变量 $X_1,X_2,\cdots,X_n$，观察 m 次，观察值如表 5-13 所示。

表 5-13　因子分析观测量与变量 X 数据

观测量	X_1	X_2	$\cdots$	X_n
1	X_{11}	X_{12}	$\cdots$	X_{1n}
2	X_{21}	X_{22}	$\cdots$	X_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
m	X_{m1}	X_{m2}	$\cdots$	X_{mn}

潜在因素 P_i 与原始观测变量 X_i 之间的关系表示为

$$\begin{cases} P_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \cdots + a_{1n}X_n \\ P_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{2n}X_n \\ \quad\vdots \\ P_m = a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \cdots + a_{mn}X_n \end{cases} \tag{5-6}$$

(1) 模型假设：原始变量是潜在因素的纯线性组合，特殊因素的作用忽略不计。因为这种线性变换不具备改变样本空间中样本点散布状态的功能。

(2) 模型条件：第一成分有最大方差，后续各主成分的方差逐次递减。其中 m 个新变量能解释原始数据大部分方差所包含的信息，公因子数根据累计贡献率尽量大的原则确定。

3. 主成分分析模型主要统计量

在模型的建立与分析过程中，需要计算与解释的统计量主要有以下几个(列于

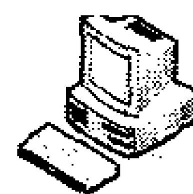


表 5-14 中)，其中部分统计量与因子分析中的计算方法和含义是相同的。

表 5-14　主成分分析模型中的主要统计量

成分号 i	特征值 λ_i	贡献率	累计贡献率	特征向量
1	λ_1	λ_1/m	λ_1/m	a_1 : $a_{11}a_{12}\cdots a_{1n}$
2	λ_2	λ_2/m	$(\lambda_1+\lambda_2)/m$	a_2 : $a_{21}a_{22}\cdots a_{2n}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	λ_m	λ_m/m	m	a_m : $a_{m1}a_{m2}\cdots a_{mn}$

(1) 特征根：是确定主成分数目的根据，反映原始变量的总方差在各个成分上重新分配的结果。特征根计算如式(5-7)

$$\lambda_i = S_P = \frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - \overline{P}_i)^2}{m-1},\quad \sum_{i=1}^{m}\lambda_i = m \tag{5-7}$$

式中，S_P 为原始变量的总方差。

(2) 成分贡献率：各个成分所包含信息占总信息的百分比，用方差作为变量包含的信息。

成分贡献率计算如式(5-8)

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i} = \frac{S_P}{\sum_{i=1}^{m}S_P} = \frac{\lambda_i}{m} \tag{5-8}$$

(3) 累计贡献率：前 k 个成分的累计贡献率。

累计贡献率计算如式(5-9)

$$\sum_{i=1}^{m}(\lambda_i/\sum_{i=1}^{m}\lambda_i) \tag{5-9}$$

(4) 主成分判定：或者取所有特征值大于某定值的成分作为主成分；或者根据累计贡献率达到某百分比值时确定主成分。

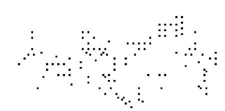
(5) 特征向量值：各个成分表达式中标准化原始变量(均值为 0，标准差为 1)的系数向量值，是写成分表达式的根据。

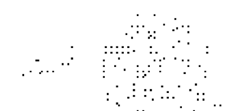
(6) 主成分分数：根据主成分表达式和各个观测变量值计算的成分值。

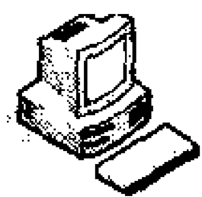
4. 主成分分析方法特征

主成分分析方法具有如下特征。

(1) 多指标的主成分分析主要用来判断某种事物或现象的综合指标并给综合指标所蕴藏的信息以恰当的解释，以便更深刻地解释事物的内在规律性。







（2）主成分分析的目的主要是根据相关矩阵或协方差的信息，用一组（总共 p 个）相互正交的主成分来说明 p 个变量的总变差。

（3）主成分分析不需要有关待分析样品或变量的任何先验信息，对变量的属性没有严格要求，只要样品达到一定数量又具有独立性、代表性，则相同属性的变量、相近特征的样本会根据各自在潜在变量空间中的位置显示出清晰的相互关系。

（4）在主成分分析中，经过原来诸多变量转化后而得到的综合指标（主成分）是相互独立的，消除了多重共线性，几个指标代表的信息不重叠，且每个主成分相应的系数是唯一确定的。

5. 主成分分析步骤

主成分分析应采取如下步骤。

第一步，建立指标体系和原始矩阵，并对原始数据进行同方向性处理。

建立指标体系时，对有高度相关性的若干个变量，或者某些变量所表示的实物与其他变量所表示的实物有一定程度的类似作用，可以取其中的一部分来代替这些变量，或初步将它们合并在一起，则可初步剔除一些重复信息，使得主成分分析的结果有很大的改进。

指标最好有同趋势化，一般为了评价分析的方便，需要将逆指标（数值越小越好的指标）转化为正指标（数值越大越好的指标），转化的方法是用逆指标的倒数值或取负值代替原指标，或用前面介绍的指标归一化方法。

第二步，将原始数据进行标准化处理。

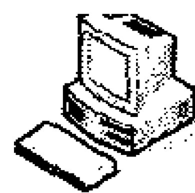
当各个指标存在数据量纲不同或者数量级差异很大时，需要对指标进行标准化处理。

标准化处理可以减小量纲和数量级对数据分析的影响，但是需要注意指标标准化也会对分析的结果产生影响。

第三步，运用 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验模型与巴特利特球度检验(Bartlett's Test of Sphericity)对数据进行检验。

第四步，计算相关系数矩阵，解特征方程并计算相关矩阵的特征值和特征向量、贡献率和累计贡献率，根据方差累计贡献率等确定因子个数，计算初始因子载荷矩阵和因子旋转矩阵，确定主成分等。

第五步，计算主因子得分和构造综合因子评分函数，并根据主因子和综合因子得分情况，给出相应的评价。



5.4.6　系统评价应用案例[①]

1. 引言

育人是高等学校的根本任务，培养“有理想、有道德、有文化、有纪律”——德、智、体全面发展的一代新人，是党和人民赋予高等学校光荣而神圣的历史使命。在高校学生工作中，随着用人机制、社会竞争机制的日臻成熟与完善，社会、学校以及用人单位对大学生的评价和考察已由简单的专业学习能力考察转变为对学生德、智、体诸方面的综合考察。如何客观、公正、准确地评价学生的德、智、体综合发展水平，一直以来是困扰学生教育与管理工作者的问题。

目前，各高等学校、系科都在尝试着做这方面的工作，比较普遍的方法是加权平均法。这种方法是把评价对象具体划分为若干小项（分级指标）赋予不同的权值和不同分数，然后加权平均所得。加权平均方法的不足在于不能体现学生分数之间差异性所反映的情况，也不能体现德育、智育、体育成绩等各方面分数对总评成绩的贡献度。因此仍有值得改进和商榷的地方。

作为评价对象，学生的德、智、体水平本身具有模糊特征。具体地说，具有以下四个特征。

(1) 评价因素的多元性。即要评价学生的德智体综合素质，就要考虑多方面的因素，比如政治态度、集体观念、理论修养、纪律观念、学习成绩、学习勤奋程度、计算机外语能力、身体健康、坚持锻炼身体、人际关系等诸方面；此外，各评价因素还可能具有二级多元因素，甚至出现多级多元因素。

(2) 评价因素的模糊性。有些指标所产生的直接信息是非数据类型信息。即每个评价因素都很难用具体的数字量化描述和考核。比如我们难以用一个具体的数字来描述一个学生的政治态度或学习勤奋程度应得多少分。

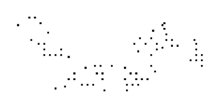
(3) 评价实施主体的客观差异性。比如，学生道德水平应是学生、老师各自依据自己所掌握的标准所作出评价的综合，这就使得评价本身具有明显的主观差异性，从而导致对同一个学生的道德水平，不同的评价者会做出不同乃至相反的评价。

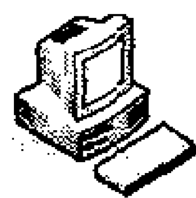
(4) 评价实施主体的多元性和复杂性。评价的实施客体是学生，即要对谁进行评价，主体是实施评价的人，即谁要对学生进行评价。评价的主体一般应包括学生（被评价者的本班同学）、老师和分管领导，不同的实施主体，对同一客体所做出的评价也会因工作的侧重点不同而有所不同。

基于以上分析，本文建立了模糊综合评价模型，可以从最终评价结果中得出学生在德、智、体各方面的发展情况，及学生在这些方面发展的偏重程度，从而最终对学生的德、

---

① 唐幼纯，范君晖．上海工程技术大学学报，2007．





智、体综合素质做出比较客观、准确和公正的评价。

2. 模糊综合评价的数学模型

模糊方法是 20 世纪 60 年代美国科学家扎德教授创立的，是针对现实中大量的经济现象具有模糊性而设计的一种评判模型和方法，在应用实践中得到有关专家不断演进。该方法既有严格的定量刻画，也有对难以定量分析的模糊现象进行主观上的定性描述，把定性描述和定量分析紧密地结合起来，因而，可以说是一种比较适合绩效综合评价的评价方法。

模糊综合评价法的基本原理及其步骤如下。

(1) 确定评价对象集： $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_k\}$

确定评价要素(指标)集： $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$

确定评价等级(评语)集： $\underset{\sim}{Y}=\{\underset{\sim}{y}_1,\underset{\sim}{y}_2,\cdots,\underset{\sim}{y}_n\}$

(2) 确定评价要素权重集： $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$, $\sum w_i=1$

在进行综合评价时，确定要素集中各要素权重是较困难的一环，但也是极重要的一环，它直接影响着评价的结果。

(3) 建立隶属度函数：设 $X\rightarrow\underset{\sim}{Y}$ 的模糊关系为 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$，则 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=\mu_{\underset{\sim}{Y}}(x)$ 称为梯速度函数(隶属函数)，由隶属函数建立隶属度矩阵，即

$\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$: $X\times\underset{\sim}{Y}\rightarrow[0,1]$ 可以用一个 $m\times n$ 阶矩阵表示

$$\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}=(r_{ij})m\times n=\begin{bmatrix}r_{11}&\cdots&r_{1n}\\ \vdots&&\vdots\\ r_{m1}&\cdots&r_{mn}\end{bmatrix}$$

式中 r_{ij} 是隶属函数值 $\mu_{\underset{\sim}{y}_j}(x_i)$，$r_{ij}\in[0,1]$。$r_{ij}$ 表示从第 i 个要素 x_i 着眼属于第 j 种等级 $\underset{\sim}{y}_j$ 的可能程度。

(4) 作矩阵的合成运算，并做归一化处理：$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\boldsymbol{R}$, $\sum s_i=1$

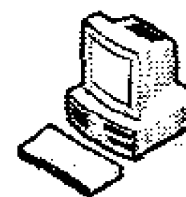
其中模糊关系合成运算符“$\circ$”可以使用布尔运算 $M(\wedge,\vee)$，其中“$\wedge$”表示 $a\wedge b=\min\{a,b\}$；“$\vee$”表示 $a\vee b=\max\{a,b\}$，或 $M(\times,\vee)$，其中“$\times$”就是普通的算术乘；或加权平均型模型 $M(\times,\oplus)$，其中$\oplus$表示 $a\oplus b=\min\{a+b,1\}$。

(5) 根据最大隶属度原则，作出综合评价结果。

3. 模型案例设计

本设计案例，用模糊综合评价方法评价“学生甲”在“德、智、体”三方面是否全面发展，其中学生的“德育成绩”用专家评价法确定其隶属度；学生甲的“智育成绩”用一个学期的 4 门功课成绩：

$$X_{甲}=\{89,98,78,64\}$$



对应的隶属度表示；学生甲的“体育成绩”隶属度可以采取该生的体育课成绩计算，案例中的计算为假设数据。

1）对学生甲进行智育模糊综合评价

（1）确定对象集、因素集和评语集

评价对象：学生甲。

评价要素指标：学生甲的“智育成绩”，其中，$X_{甲}=\{89,98,78,64\}$

评价要素权重：$W=\{0.25,0.25,0.25,0.25\}$

本文在计算过程中，采取的是平均权重，实际评价过程中，可取每门课的相应学分进行归一化，作为权重。

评语集：$\underset{\sim}{Y}=\{$优，良，中，差$\}=\{$85 分以上，70～85 分，60～70 分，60 分以下$\}$，其中，优、良、中、差的评语等级在以下的计算过程中用$\underset{\sim}{y}_1,\underset{\sim}{y}_2,\underset{\sim}{y}_3,\underset{\sim}{y}_4$ 表示。

建立相应的隶属函数如图 5-8 所示。

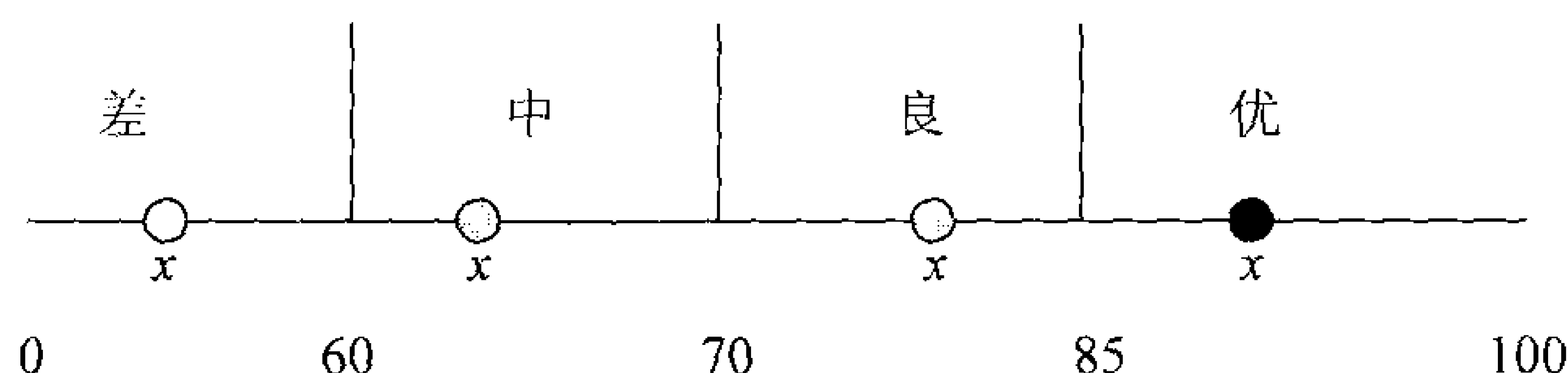


图 5-8　隶属函数

（2）建立模型的隶属度评价原则

如：$x=98$ 分，则看 x 属于“优”和属于“良”的程度，可采用公式“x 越大，‘优’的程度越大”。这是递增型，其隶属度函数 $\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(x)$可以用以下公式计算：

$$\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(x)=\frac{x-a}{b-a}=\frac{98-85}{100-85}=0.87$$

即“x 越大，离‘良’越远”，这是递减型，可以用公式：

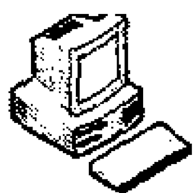
$$\mu_{\underset{\sim}{y}_2}(x)=\frac{b-x}{b-a}=\frac{100-98}{100-85}=0.13$$

显然

$$\mu_{\underset{\sim}{y}_3}(x)=\mu_{\underset{\sim}{y}_4}(x)=0$$

因此，分别建立的隶属度函数如下：

$$\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(x)=\begin{cases}1, & x\geqslant 100\\ \dfrac{x-85}{100-85}, & 85\leqslant x<100\\ 0, & x<85\end{cases}\qquad \mu_{\underset{\sim}{y}_2}(x)=\begin{cases}0, & x\geqslant 100\\ \dfrac{100-x}{100-85}, & 85\leqslant x<100\\ \dfrac{x-70}{85-70}, & 70\leqslant x<85\\ 0 & x<70\end{cases}$$



$$\mu_{\underset{\sim}{y}_3}(x)=\begin{cases}0, & x\geqslant 85\\ \dfrac{85-x}{85-70}, & 70\leqslant x<85\\ \dfrac{x-60}{70-60}, & 60\leqslant x<70\\ 0, & x<60\end{cases}\qquad \mu_{\underset{\sim}{y}_4}(x)=\begin{cases}0, & x\geqslant 70\\ \dfrac{70-x}{70-60}, & 60\leqslant x<70\\ 1, & x<60\end{cases}$$

建立对应的隶属度函数如图 5-9。

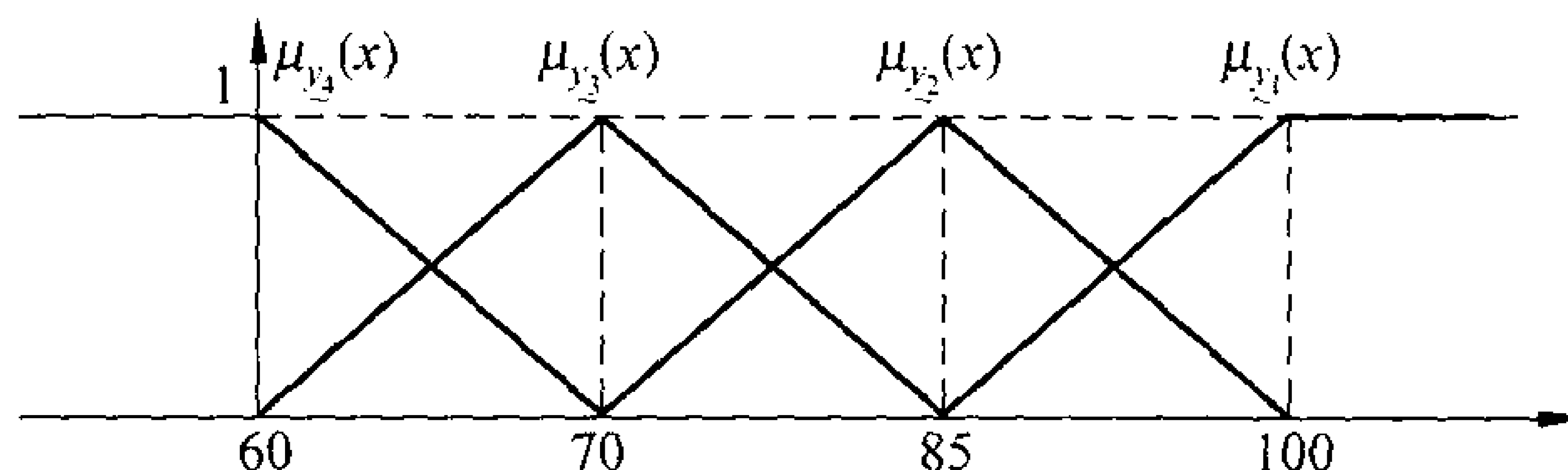


图 5-9 隶属度函数图

(3) 计算隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$(r_{ij}表示 x_i 隶属于$\underset{\sim}{y}_j$ 的程度)

计算过程如下:

$$r_{11}=\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(89)=\frac{89-85}{100-85}=0.27,\quad r_{12}=\mu_{\underset{\sim}{y}_2}(89)=\frac{100-89}{100-85}=0.73,$$

$$r_{13}=\mu_{\underset{\sim}{y}_3}(89)=0,\quad r_{14}=\mu_{\underset{\sim}{y}_4}(89)=0$$

$$r_{21}=\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(98)=\frac{98-85}{100-85}=0.87,$$

$$r_{22}=\mu_{\underset{\sim}{y}_2}(98)=\frac{100-98}{100-85}=0.13,\quad r_{23}=r_{24}=0$$

$$r_{31}=\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(78)=0,\quad r_{32}=\mu_{\underset{\sim}{y}_2}(78)=\frac{78-70}{85-70}=0.53,$$

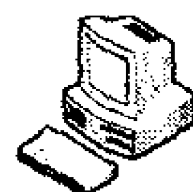
$$r_{33}=\mu_{\underset{\sim}{y}_3}(78)=\frac{85-78}{85-70}=0.47,\quad r_{34}=0$$

$$r_{41}=\mu_{\underset{\sim}{y}_1}(64)=r_{42}=0,\quad r_{43}=\mu_{\underset{\sim}{y}_3}(64)=\frac{64-60}{70-60}=0.4,$$

$$r_{44}=\mu_{\underset{\sim}{y}_4}(64)=\frac{70-64}{70-60}=0.6$$

根据上述计算结果,建立隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.27 & 0.73 & 0 & 0\\ 0.87 & 0.13 & 0 & 0\\ 0 & 0.53 & 0.47 & 0\\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6\end{bmatrix}$$



综上所述，对学生甲进行智育模糊综合评价（其中，模糊乘"∘"取自 $M(\times,\wedge)$）：

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\begin{bmatrix}0.27 & 0.73 & 0 & 0\\0.87 & 0.13 & 0 & 0\\0 & 0.53 & 0.47 & 0\\0 & 0 & 0.4 & 0.6\end{bmatrix}=(0.22,0.18,0.12,0.15)$$

对 $\boldsymbol{S}$ 矩阵进行归一化处理：$\boldsymbol{B}=(0.33,0.27,0.18,0.22)$

结果表明：学生甲的智育成绩"优"因子有 33%，"良"因子有 27%，"中"因子有 18%，"差"因子有 22%。

根据最大隶属度原则，该学生四门课成绩的综合评价结果偏"优"。

2）对学生甲分别进行"德育"和"体育"模糊综合评价

用专家评价法给出德育隶属度，智育用第一步的综合评价结果作为智育隶属度，体育隶属度假定。则得到结果如图 5-10。

	全面	较全面	不太全面	不全面
德育	0.3	0.5	0.2	0
智育	0.33	0.27	0.18	0.22
体育	0.5	0.5	0	0

图 5-10　德、智、体综合初始隶属度

3）对学生甲"德、智、体"三方面是否全面发展进行综合评价

评价要素：$X=\{$德育，智育，体育$\}=\{X_1,X_2,X_3\}$

评价要素权重设为：$W=\{0.40,0.30,0.30\}$

评价等级 $\underset{\sim}{Y}=\{$全面发展，较全面发展，不太全面发展，不全面发展$\}$

$=\{\underset{\sim}{y}_1,\underset{\sim}{y}_2,\underset{\sim}{y}_3,\underset{\sim}{y}_4\}$

得到学生甲的德、智、体隶属度矩阵为

$$\begin{bmatrix}0.3 & 0.5 & 0.2 & 0\\0.33 & 0.27 & 0.18 & 0.22\\0.5 & 0.5 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

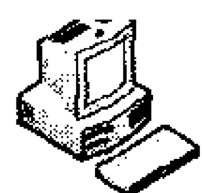
学生甲德、智、体模糊综合评价的结果为

$$\boldsymbol{W}\circ\begin{bmatrix}0.3 & 0.5 & 0.2 & 0\\0.33 & 0.27 & 0.18 & 0.22\\0.5 & 0.5 & 0 & 0\end{bmatrix}=(0.15,0.2,0.08,0.07)$$

归一化处理得：(0.30,0.40,0.16,0.14)

根据最大隶属度原则，学生甲综合评价结果是德、智、体三方面"较全面发展"。

用同样的方法可以对其他学生进行评价。



4. 与加权平均方法的比较

设计案例：学生乙的功课成绩分别是：$X_{乙}=\{98,55,55,55\}$

采用模糊综合评价模型，计算得隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.57 & 0.17 & 0 & 0\\0 & 0 & 0 & 1\\0 & 0 & 0 & 1\\0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

归一化，综合评价：$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{R}=(0.2153,0.0421,0,0.7426)$

根据最大隶属度原则，学生乙属于“差”的程度为 74.26%，可以认为该生的智育成绩为“差”。

而如果采用通常的加权平均法计算，则平均成绩为

$$0.25\times98+0.25\times55+0.25\times55+0.25\times55=65.75$$

因此，该生的智育成绩为“中”。

比较两种方法最后的结论，显然模糊综合评价方法的结果更符合实际。

5. 结论

从上述例子可见，模糊综合评价法区别于加权平均法的明显地方是，评价的数据是模糊的，且能够将不易直接测量的评价问题，转化成可以定性和定量测量的问题，从而比较科学、全面地反映出学生的德、智、体素质情况。

本例中建立的模型在综合评价学生素质时更精确、更客观一些。比如，假设两个学生的智育测评分分别是 81，89，那么一般的测评结果是两个学生都是“良”，文中的模型可以区分这两个测评分的偏重程度。

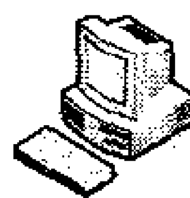
模糊综合评价方法的运算量较烦琐，但是借助于计算机可以方便、快捷地完成。

使用模糊评价法对学生进行德、智、体综合评价产生的大量数据，除进行学生个人的德、智、体综合素质评价外，这些数据同样可以进行团体素质情况的综合评价和分析。例如可以引用所有学生的德育成绩，在总体上对该班的德育情况进行分析评价，并可用来进一步指导我们的学生工作。

本例的下一步研究工作是将该模型系统化、软件化、界面化，便于用户将分数输入后，可以直接得出学生的综合评价结果，增强该方法的可操作性。

本章小结

系统评价是按预定的系统目标，在系统调查和可行性研究的基础上，对研究对象的功能进行数量化描述，对研究对象的结构进行间接描述。



系统评价作为一种对客观事物进行评定、明确评价对象应用价值的处理方法，已经在社会经济发展、工程技术研究、企业经营管理等各个方面得到了广泛应用。系统评价是系统工程中的一步重要的工作，是系统分析中的一个重要环节。

对于多目标系统的评价，一方面要把它分解成若干个子系统，分别建立模型，然后应用系统分析的方法求得各个指标的最优解；另一方面还要把这些工作综合起来得到一个完整的方案，再对该完整方案作出正确的评价。这就需要用一整套评价指标即评价指标体系来作为系统评价的依据。因此，评价指标或者评价指标体系是评价方案实现系统目标的评价依据。

思考题

1. 何谓指标的数量化？“教学质量”指标属于什么指标？如何对其量化？

何谓指标的归一化？举例说明实现指标归一化的处理方法和处理结果。

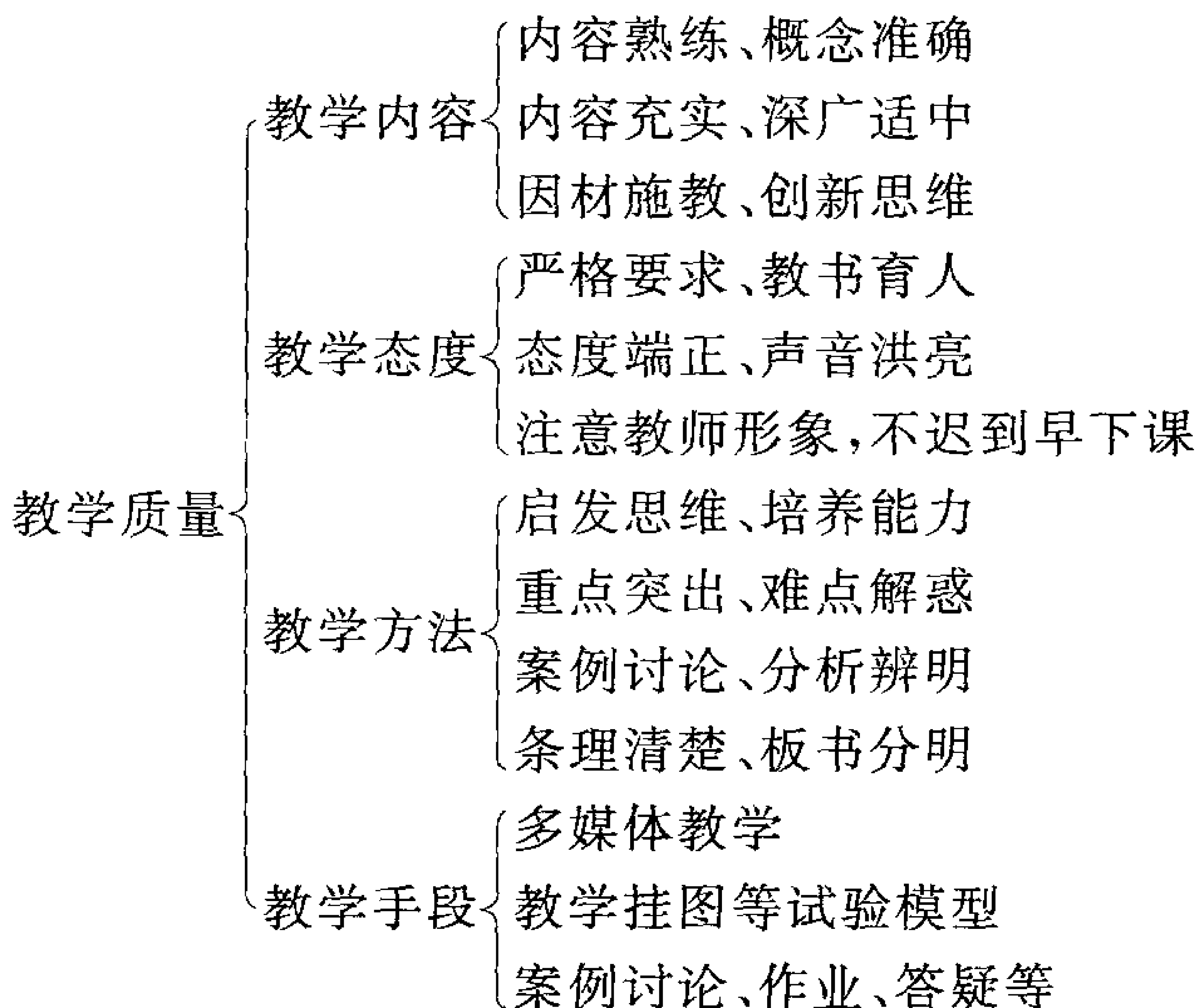
何谓指标的有序化？给出在此之前你所学过能够对指标实行有序化的方法。

2. 比较专家评价法、两两比较法、连环比例法这三种方法的优劣。

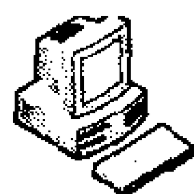
3. 分别用专家评价法、两两比较法对例 4-1 中甲、乙、丙三位学生的工作能力进行评价。

4. “方案”是实现系统工程活动目标的方法、途径、手段等，关系到系统工程活动的目标是否得以实现及实现的优劣。给定例 4-1，试对其方案进行优劣评价并给出最优方案。

5. 现有如下课程教学质量评价指标体系：



(1) 以班级为单位，用经验评价法的两两比较法给出“教学质量”的四个方案“完善教学内容”、“端正教学态度”、“擅长教学方法”、“丰富教学手段”的权重。



（2）用经验评价法的专家评价法对某课程给出“教学质量”的评价。

6. 某课程教学质量模糊综合评价

（1）建立“课程教学质量”综合评价指标体系。

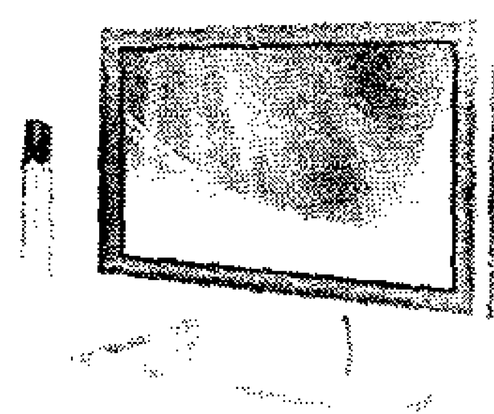
注：老师的“课程教学质量”指标体系可供参考。

（2）用经验评价方法确定“课程教学质量”评价指标体系的权重。

（3）模糊综合评价方法编程。

（4）对本学期课程进行模糊综合评价。

（5）分析评价结果。



第6章 MC系统仿真

本章关键词

系统仿真(system simulation)　蒙特卡罗仿真(monte carlo)

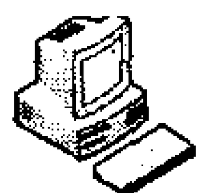
本章要点

系统仿真又称为系统模拟分析(simulation analysis),是系统分析的重要方法,是对实际系统进行试验研究的过程,即利用模型来模拟事物发展变化的规律。本章介绍系统仿真的特点和作用,重点介绍MC方法的原理和应用。

6.1 系统仿真的概念

系统仿真是20世纪40年代末以来伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科。系统仿真又称为系统模拟分析,是系统分析的重要方法,是对实际系统进行试验研究的过程,即利用模型来模拟事物发展变化的规律。最初,仿真技术主要用于航空、航天、原子反应堆等价格昂贵、周期长、危险性大、实际系统试验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金、机械等一些主要工业部门,并进一步扩大到社会系统、经济系统、交通运输系统、生态系统等一些非工程系统领域。可以说,现代系统仿真技术和综合性仿真系统已经成为任何复杂系统,特别是高技术产业不可缺少的分析、研究、设计、评价、决策和训练的重要手段。由于安全上、经济上、技术上、时间上等原因,对实际系统进行真实的物理试验很困难或者跟踪记录试验数据难以实现时,仿真技术就成为必不可少的工具。近几十年来,随着计算机技术的发展,仿真技术和计算机技术迅速融合,仿真技术也越来越受到人们的重视,其应用范围在不断扩大,应用效益也日益显著。

系统仿真也可以认为是通过建立和运行实际系统的仿真模型,来模仿系统的运行状态和规律,以实现在计算机上进行试验的全过程。因此,这个过程应尽量能够反映系统的主要特征。



注意：采用模型来模拟系统时，一般均忽略微小因素和次要因素，而只反映出对事物发展有重大影响的主要因素。事实上，在实际运用中，事物的主要因素和次要因素的划分是相对的，这主要是从用户需求的角度来分析。例如，考察一个网络链路传播系统：当用户通过 Telnet 远程登录时，则希望传播延迟最小，这时链路的传播延迟就是主要因素；当用户通过 FTP 下载文件时，则希望链路吞吐量越大越好，这时链路的利用率就成为主要因素；当用户通过网络参加实时会议时，则希望网络的服务传播及时、通畅、无停顿，这时链路的最小抖动就成为用户关心的问题。因此，①模拟常被称为建立现实要素的方法，而不在于求得现实的本身；②不能提供最优解，但是通过仿真多次运行结果可以从中选择出最好的方案。

6.2 系统仿真的特点和作用

6.2.1 系统仿真的特点

系统仿真具有如下特点。

（1）面向实际过程和系统问题。系统仿真模型是面向实际过程和系统问题的，或者说是问题导向的，其包含系统中的元素对象以及元素之间的关系，它将不确定性作为随机的系统变量来建立系统的内部结构关系模型。

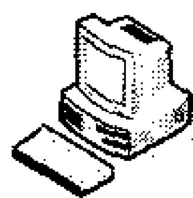
（2）一种试验手段。系统仿真技术是一种试验手段，是为复杂系统创造的一种计算机的试验环境，它是一种计算机软件试验，输出结果由仿真软件给出，因此可以在短时间内通过计算机获得对系统运行规律以及未来特性的认识。

（3）多次独立地重复模拟过程。系统仿真研究由多次独立的重复模拟过程所组成，因为一次仿真的结果是对系统行为的一次抽样结果，而多次仿真的结果才是对真实系统运行具有一定样本量的随机试验样本。因此需要进行多次试验的统计推断，并对系统的性能和变化规律作多因素的综合评价。

（4）得到问题的一个特解或可行解。系统仿真只能得到问题的一个特解或可行解，而不能得到问题的通解或最优解。而且，对于同一问题可能会得到不同的模型，得到的模型也常常是不精确的。但是，随着计算机科学技术的发展，这些问题正在得到不同程度的改善。

6.2.2 系统仿真的作用

系统仿真已经渗透到各个领域、各行各业，用于解决多种问题，其作用越来越强。下面列举了系统仿真的部分作用。



(1) 模拟分析一个经济机构或其子系统的内部复杂的相互关系。

(2) 模拟系统在资料、组织、环境等上的变化所产生的影响,然后改变系统模型和观察系统状态变化来分析研究系统。

(3) 对复杂系统的模拟能够有益地洞察到系统的变量哪些是较为重要的,它们是如何互相影响的。

(4) 在很少或没有资料的特殊情况下,通过模拟可以对可能发生的情况有思想准备。

(5) 模拟可以用来对实际系统中新的政策或决策规划进行“事前试验”,以避免对实际系统进行试验的风险。

(6) 对某些类型的随机问题,事件发生的顺序可能具有特别的重要性。在预期可以得到的关于数值和时间资料不足以充分描述这个过程的情况下,模拟方法或许是唯一能够提供所需资料的好方法。

(7) 模拟能够用来验证某些分析得到的结果,例如蒙特卡罗模拟能够用来验证某些数学分析得到的结果。

(8) 模拟使人们能够在正常期、紧缩期或延长期内研究动态系统。

(9) 对被模拟系统进行细致的观察后能对系统有更清晰的了解,从而提出科学合理的改进意见。

由以上对系统仿真定义以及特点的分析可知,实施一项系统仿真的研究工作,必须要做好三个方面的准备工作:系统对象、系统模型、计算机工具。因此,分别从这三个方面出发,可以对系统仿真进行基本的分类。

根据实际系统对象的类型,系统仿真可以分为物理仿真、数学仿真、物理-数学仿真。根据研究的系统对象的性质,系统仿真可分为连续系统仿真和离散系统仿真。根据仿真中使用的计算机处理数据的类型,系统仿真又可分为模拟仿真、数字仿真和混合仿真。

6.3　系统仿真的一般步骤

不管系统仿真如何分类,根据系统仿真的基本概念和分析、求解问题的思路,在进行系统仿真研究活动时,一般都遵循如下的基本步骤。

(1) 系统性问题的描述、定义和分析。

(2) 建立系统仿真模型。

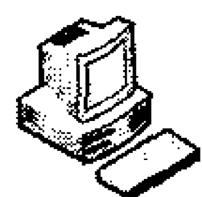
(3) 数据采集和筛选。

(4) 仿真模型的编程实现与验证。

(5) 仿真模型的运行。

(6) 仿真结果的输出、记录。

(7) 分析数据,得出结论。



在实施系统模拟仿真研究时，上述系统仿真的基本步骤也不是不可以变化的，针对不同的问题和方法，往往需要反复进行模型验证、输出分析、统计推断等过程，直到为决策者提供一个满意的方案为止，因此仿真的过程是一个辩证的、迭代的甚至于不断反馈修正的过程。

6.4 蒙特卡罗(MC)仿真方法

蒙特卡罗(Monte Carlo，MC)仿真是一种特殊的数值计算仿真方法，该方法是以概率论和数理统计理论为指导的模拟方法，它是充分利用计算机计算能力的随机试验方法。

在系统工程设计中，定量模型的建立往往不能为制定决策提供充分的信息，甚至可能会导致严重的数学错误。而建立包含不确定因素的模型是一个非常复杂的过程，蒙特卡罗仿真模型既是一种常用的包含不确定因素的仿真模型，也是常用的系统工程分析方法。该方法可以利用计算机的功能，避免系统工程设计中直接考虑不确定性因素时所遇到的数学难题。

6.4.1 随机数概念

任何本质上属随机过程的系统仿真都需要一种产生或获得随机数的方法。这种仿真的例子在中子随机碰撞、数值统计、队列模型、战略游戏以及其他竞赛活动中都会出现。蒙特卡罗计算方法需要有可得的、服从特定概率分布的、随机选取的数值序列。

1. 随机数定义

关于随机数，有人从统计学角度给与阐述，也有人从混沌学角度给与了很好的诠释。

统计学认为，具有确定分布和概率、位于一定阈值内的一组数称为随机数。或者出现几率相等的一系列数中，靠随机方法抽取出来的数称为随机数。也有人将随机数直接定义为均匀分布在(0,1)上的一堆乱数。

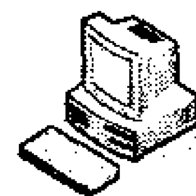
而混沌学则认为，当一组数紊乱到一定的程度，这组数就可以被称为随机数。

注意：*为了方便地使用随机数，我们在附录中给出了随机数表。对随机数表的使用需要说明的是，任何一行、一列或从任何一个位置开始往任何一个方向(上、下、左、右、斜)连续产生的一串数都是一串随机数。*

2. 用随机数表模拟抽样的方法

例 6-1 在 50 名同学(学号 20～69)中随机抽出 5 位同学参加某项活动，用附录中给出的随机数表模拟抽样。

解 显然每位同学被抽到的机会相等，即服从于均匀分布。从附录一(均匀分布的随机数表)如第 3 行第 6 个数 56 开始，按行往下读介于 20～69 之间的 5 个数：56，38，49，



57,44,这 5 个随机数即代表被抽到的 5 位同学的学号。

注意：这种方法可能会丢掉过多的不在区间内的数，因而可能会造成随机数的“伪”性加大。

例 6-2　设某商店每天到达的顾客数是随机的，一个月的统计结果表明，一天最多到达 60 位顾客，最少有 25 位顾客。现模拟今后一个星期内平均每天有多少顾客。假定每天到达的顾客多少的机会相同，即不存在月初、月中或月尾及休息天的差别。

解　根据假设，顾客到达的概率服从均匀分布。下面分三步进行模拟。

第一步，产生随机数。从附录一随机数表如第 11 行第 6 个数开始按行读出 7 个两位数：

$$44,17,16,58,09,79,83 \in [0,100]$$

第二步，作变换。因为 $x \in [25,60]$，所以将$[0,100]$的 7 个数 y 应用变换公式：

$$X = \frac{35y + 2\,500}{100}$$

进行变换得到：$40,31,31,45,28,53,54 \in [25,60]$

第三步，由此得这一星期每天的平均顾客数为 $S = \frac{40+31+31+45+28+53+54}{7} = 40$。

注意：这种模拟抽样方法要进行区间变换，当随机数很多时较为麻烦。

这里再介绍一种模拟抽样方法，既不用变换区间也不会丢掉过多的不在区间内的随机数，可以克服前面两种方法的弊端。方法分为四步。

第一步，由$10^{m-1} \leqslant N \leqslant 10^m$（$N$ 是样本点总数）确定 m。

第二步，求 a：$a=10^m/N$ 的整数部分，即 $a=[10^m/N]$。

第三步，产生随机数 b。

第四步，由随机数 b 确定样本编号：

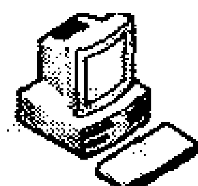
$$编号 = \begin{cases} \dfrac{b}{a}, & \left[\dfrac{b}{a}\right]是整数 \\ \left[\dfrac{b}{a}\right]+1, & \left[\dfrac{b}{a}\right]不是整数 \end{cases}$$

例 6-3　项目检查组要从一批 30 个项目中随机抽取 4 个项目参加检查。

解　第一步，$N=30$，则$10^1 \leqslant 30 \leqslant 10^2$，所以 $m=2$。

第二步，$a= [10^2/30]=[3.33]=3$

第三步，产生 4 个随机数，均匀分布在$[0,100]$内。例如，从附录一随机数表第 16 行



第 6 个数 40 开始按行读出的 4 个随机数：40,33,20,38

第四步，由随机数 b 产生样本编号：[40/3]+1=14 号

[33/3]=11 号

[20/3]+1=7 号

[38/3]+1=13 号

由此抽样得出的 14 号、11 号、7 号和 13 号为被检查项目。

例 6-4 某大学学院需要 20 名学生参加某项活动。该学院的每位学生都有参加该活动的权利，为了公平选择，现从该院的 256 名学生中随机抽出 20 名学生参加。

解 将该院的 256 名学生编号，依次为 1 号、2 号、…、256 号。

第一步，$N=256$，则$10^2\leqslant 256\leqslant 10^3$，所以 $m=3$。

第二步，$a=[10^3/256]=[3.906\ 25]=3$

第三步，产生 20 个随机数，均匀分布在[0,1000]内。从附录一随机数表第 21 行开始按行读出 3 个数字的随机数：683,430,137,055,743,077,404,422,788,426,043,346,095,268,079,706,577,457,256,576

第四步，由随机数 b 产生样本编号：[683/3]+1=227+1=228 号

[430/3]+1=143+1=144 号

[137/3]+1=45+1=46 号

[55/3]+1=18+1=19 号

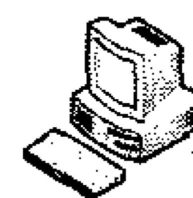
⋮

[576/3]=192 号

采用 MC 方法仿真实际问题时，通常需要产生服从给定概率分布的随机数。一旦掌握了产生(0,1)区间中平均分布的随机数方法，总可以从平均分布的随机数中找到依照所需分布的随机数。

3. 伪随机数

蒙特卡罗方法要解决的第一个问题就是如何得到一个大型的随机数集合。进行一项模拟有时需要使用几百万甚至几十亿个随机数。为解决随机数问题，目前已经开发出许多种算法(称为随机数生成器)，这些算法的区别在于如何获得随机性。可以通过几种不同的统计值来测量随机数生成器的随机性。首先，理想的随机数生成器应该能够生成在[0,1]区间均匀分布的一系列随机数，而不应该出现某个区间中的随机数多，而其他区间中的随机数少的情况。除了要求随机数均匀分布外，还要求产生的随机数不能重复。从严格意义上讲，就是要求生成的随机数不能具有周期性。简而言之，既要求随机数生成器在[0,1]区间上生成的随机数不具有可预测性，又要求随机数生成器能够生成大量的随机数，即用一个数作“种子”生成下一个随机数。事实上，要完全消除随机数的周期性问题是很不容易的。



产生伪随机数的随机数生成器有很多，这里仅举两个早期使用且简单的随机数生成器，以此介绍产生（伪）随机数的过程。

1）平方取中法

平方取中法（midsignare technique），这种随机数生成器最早是由计算机鼻祖冯·诺依曼提出来的。该方法开始时是在生成器中选一个 $2r$ 数字作“种子”，然后平方取中间数作为第一个随机数，再以此为种子，平方取中后得第二个随机数，以此类推得到一系列（伪）随机数。

例如，取二位数 25 为种子，平方取中可以得到一系列二位随机数列：

$$x_0=25$$

$$(25)^2=0\,625 \quad x_1=62$$

$$(62)^2=3\,844 \quad x_2=84$$

$$(84)^2=7\,056 \quad x_3=05$$

$$(05)^2=0\,025 \quad x_4=02$$

$$(02)^2=0\,004 \quad x_5=00$$

$$(00)^2=0\,000 \quad x_6=00$$

可见，接下去的数字全是零。

注意： 这种方法一旦出现数是零之后，后面将都是零，因此该方法已经很少使用。

2）线性同余数法

线性同余数法（linear congruential method）（Thesen，1989）作为随机数生成器，由递推关系式确定：

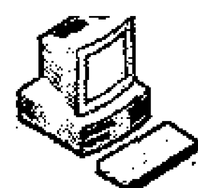
$$x_{n+1}=(Ax_n+C)\bmod(M), \quad n\geqslant 0$$

式中：A 和 C 是常数，mod(M)是取模操作。

例如，对于 $x_{i+1}=(5x_i+1)\bmod(16)$ 这个随机数生成器生成的一系列随机数如表 6-1 所示。

表 6-1　线性同余数法生成的随机数表

i	x_i	$5x_i+1$	x_{i+1}
1	1	6	6
2	6	31	15
3	15	76	12
4	12	61	13
5	13	66	2



续表

i	x_i	$5x_i+1$	x_{i+1}
6	2	11	11
7	11	56	8
8	8	41	9
9	9	46	14
10	14	71	7
11	7	36	4
12	4	21	5
13	5	26	10
14	10	51	3
15	3	16	0
16	0	1	1

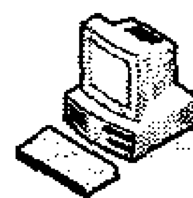
显然该随机数生成器继续生成将出现周期循环现象。

实际应用中的随机数生成器其实都是通过某些数学公式得到的，这样的生成器产生的随机数存在诸如周期循环问题，严格意义上已经不再随机，我们称之为伪随机数(pseudorandom numbers)。

注意：随机数生成器的算法有很多。不管采用什么方法，在使用随机数生成器时，应注意以下几个问题：尽量不要使用不了解的随机数生成器；在选用一个随机数生成器之前，应用多种不同的方法进行详细的检验；不要使用即兴方法来改进随机数生成器。

6.4.2 蒙特卡罗仿真概述

蒙特卡罗仿真得名于Monaco(摩纳哥)内以赌博娱乐而闻名的一座城市——蒙特卡罗。赌博的人可以在此参加各种赌博，如掷骰子、轮盘赌和各种扑克牌游戏。这些赌博活动既能让参加赌博的人感到刺激，又能给赌场带来丰厚的收益。因为在转轮盘、掷骰子或洗牌时少有差别，就可能产生无法预测的结果。例如，即使连续多次转轮盘，也无法找出轮盘上出现数字的规律，也看不出哪个数字出现的频率比其他的数字高。如果连续掷普通骰子，就会发现骰子6个面出现的概率和随机性是相同的。



1. 蒙特卡罗仿真方法的数学基础

蒙特卡罗仿真方法是以概率论和数理统计理论为基础,用一系列随机数来近似解决问题的一种方法。该方法是通过寻找一个概率统计的相似体并用试验取样过程来获得该相似体的近似解,是对各种非确定性问题进行模拟仿真。具体表现为,该方法通过以一定的概率分布产生的一列随机数来模拟可能出现的随机现象,产生概率统计的相似体,并用试验取样过程获得该相似体的近似解。

每次模拟只能描述出被模拟系统可能出现的一次情况,多次模拟则可以得到利用通常数学模型无法掌握的资料,因此蒙特卡罗仿真方法也是处理数学问题的一种手段。运用该近似方法所获得的问题的解更接近于物理试验结果,而不是经典数值计算结果。

2. 蒙特卡罗仿真方法的内涵

从概念上理解,蒙特卡罗仿真方法非常简单。例如,对于图 6-1 中所示正方形中的不规则图形,要计算不规则图形的面积应用蒙特卡罗仿真方法容易获得。正方形的面积:$A_s=s^2$,式中 s 表示正方形的边长,A_s 表示正方形的面积。从图中可以看出,不规则图形是正方形的一部分。因此,$A_b=\mu A_s=\mu s^2$,式中 A_b 表示不规则图形的面积,$0\leqslant\mu\leqslant 1$。现在只要能够求出 μ 的值,就可以知道不规则图形的面积。假如将图挂在墙上,然后站在一定远的距离外掷飞镖。假定是在随机的条件下掷飞镖,那么 μ 的值可以看做落入不规则图形内的飞镖数目与落入正方形内(含不规则图形)的总飞镖数目的比值。事实上,在随机情况下,如果投掷的飞镖越多,落入不规则图形内的飞镖数与落入正方形内的总飞镖数的比值就越接近 μ。这就是蒙特卡罗仿真方法的本质。在实际使用蒙特卡罗仿真方法的过程中,可以采用计算机产生随机数的方法来模拟掷飞镖的过程①。

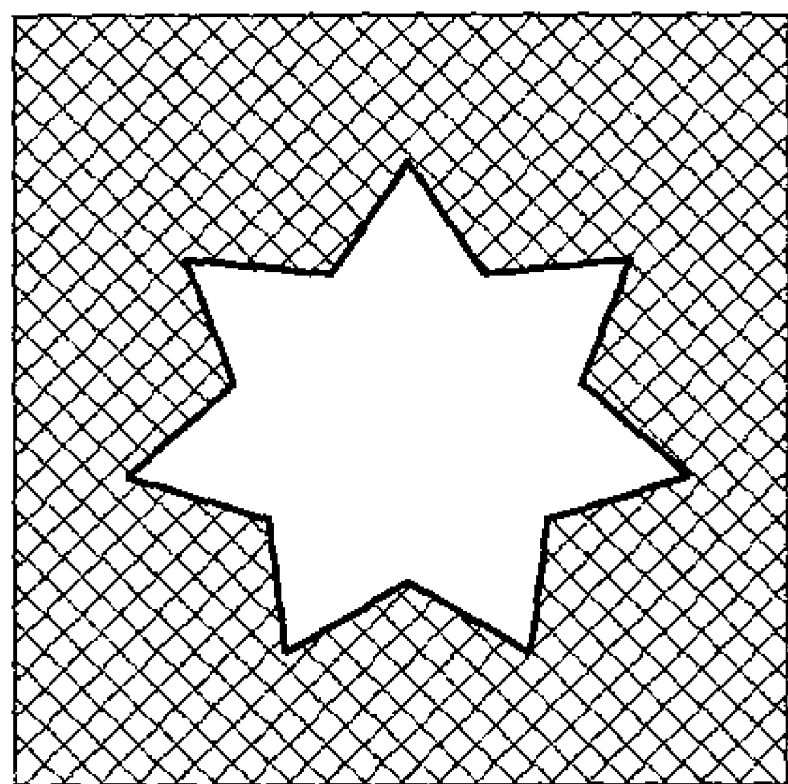


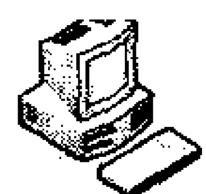
图 6-1　用蒙特卡罗仿真方法求解不规则图形面积的模型

注意:假如有一台计算机产生[0,1]区间内均匀分布的随机数,用产生的一个随机数表示正方形边长的系数,用两个随机数表示一个点在正方形上的具体位置,然后判断该点是否落在不规则图形内,记录落在不规则图形内的点数和试验的总次数,这两个数值的比值就是 μ。使用计算机的好处就是能够在很短的时间内产生大量的随机数,而且还能记录统计结果。

下面通过一个实例来介绍这种解题思路。

---

① 哈泽里格·G. A.系统工程——基于信息的设计方法(*An Approach to Information-based Design*). 代振宇,王松译. 北京:清华大学出版社,2003.

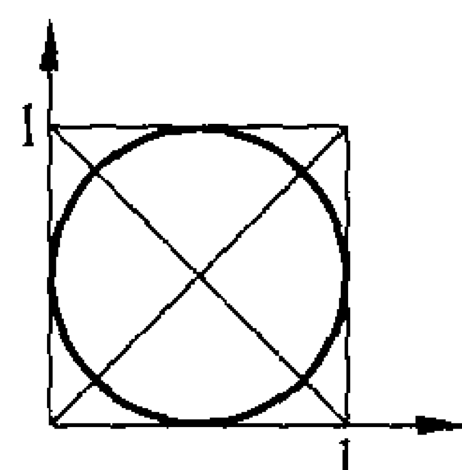


例 6-5　计算 π 的近似值。

解　(1) 产生 n 个随机数。如 $n=12$，从附录二的随机数表第 6 行开始连续取 12 个数得 6 个点：

(0.76,0.70),(0.17,0.05),(0.91,0.03),(0.30,0.31),(0.83,0.52),(0.35,0.57)

(2) 求 6 个点与中心距离 $0\leqslant d\leqslant 1/2$ 的点：



$$d_1=\sqrt{(0.76-0.5)^2+(0.70-0.5)^2}=0.33$$

$$d_2=\sqrt{(0.17-0.5)^2+(0.05-0.5)^2}=0.56$$

$$d_3=\sqrt{(0.91-0.5)^2+(0.03-0.5)^2}=0.62$$

$$d_4=\sqrt{(0.30-0.5)^2+(0.31-0.5)^2}=0.27$$

$$d_5=\sqrt{(0.83-0.5)^2+(0.52-0.5)^2}=0.33$$

$$d_6=\sqrt{(0.35-0.5)^2+(0.57-0.5)^2}=0.16$$

(3) 统计 6 个点落在圆内的个数 n_1。因为 $0\leqslant d_1,d_4,d_5,d_6\leqslant 0.5$ 所以 $n_1=4$

则 $\frac{n_1}{n}\approx\frac{\pi(1/2)^2}{1}$　所以 $\pi\approx 4n_1/n=4\times 4/6\approx 2.667$

这里计算得到的 $\pi\approx 2.667$，误差很大。如果应用计算机产生足够多的随机数来模拟，则可以根据精度要求计算 π 的值。

3. 蒙特卡罗仿真方法的流程

采用蒙特卡罗仿真方法时，基本上遵循一个约定俗成的流程，如图 6-2 所示。为存储仿真结果，计算机程序代码必须为蒙特卡罗仿真方法分配大量的存储空间。

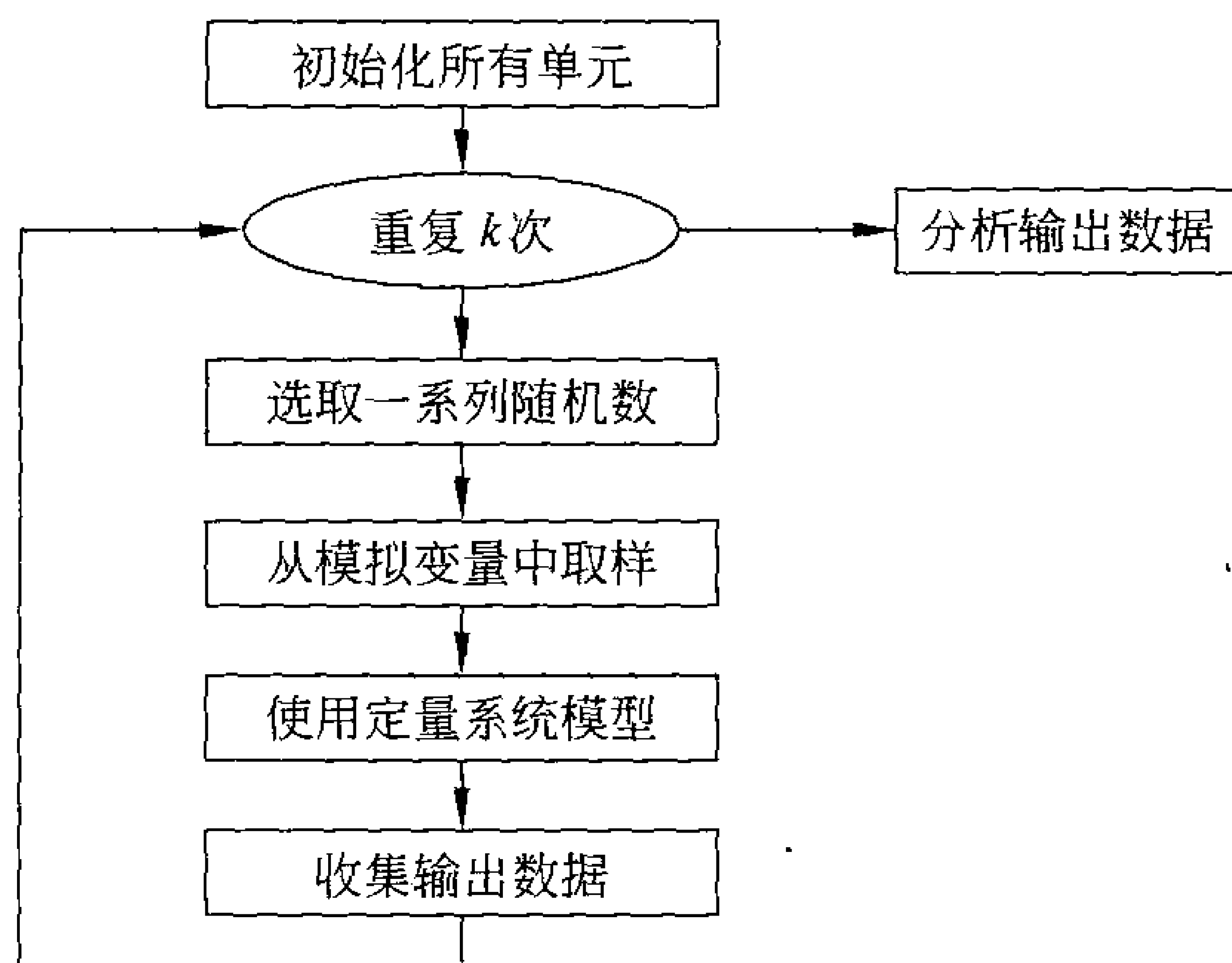
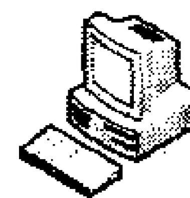


图 6-2　典型蒙特卡罗仿真方法的逻辑流程



6.4.3 蒙特卡罗(MC)仿真

1. 离散系统-均匀分布-MC 仿真

MC 仿真方法的核心步骤就是产生相应分布的随机数。假定系统的仿真变量服从于均匀分布，则 MC 仿真时可以直接应用均匀分布的随机数表获取随机数。

例 6-6　已知某机械厂过去每月生产量：可以生产 10～16 台某机器，按过去资料见表 6-2。每月成交单位数：至少能与 5 个单位，最多能与 10 个单位成交。按过去资料，每月成交单位数概率分布见表 6-3。成交单位购买的台数：购买的台数在 1 台与 3 台之间，按过去资料，20%的合同购买 1 台，购买 2 台和 3 台的合同各占 40%，见表 6-4。求用蒙特卡罗仿真方法模拟以后 10 个月内的：①产量；②成交单位数；③成交台数并综合分析总的销售情况。

表 6-2　产量及概率

产量/台	概率
10	0.05
11	0.10
12	0.20
13	0.30
14	0.20
15	0.10
16	0.05

表 6-3　成交单位数及概率

成交单位数	概率
5	0.10
6	0.15
7	0.20
8	0.40
9	0.10
10	0.05

表 6-4　成交台数及概率

成交台数	概率/%
1	20
2	40
3	40

解　用 X,Y,Z 分别表示产量、成交单位数和成交台数。则它们的分布函数 $F(X)$，$F(Y)$和 $F(Z)$分别如图 6-3 至图 6-5 所示。

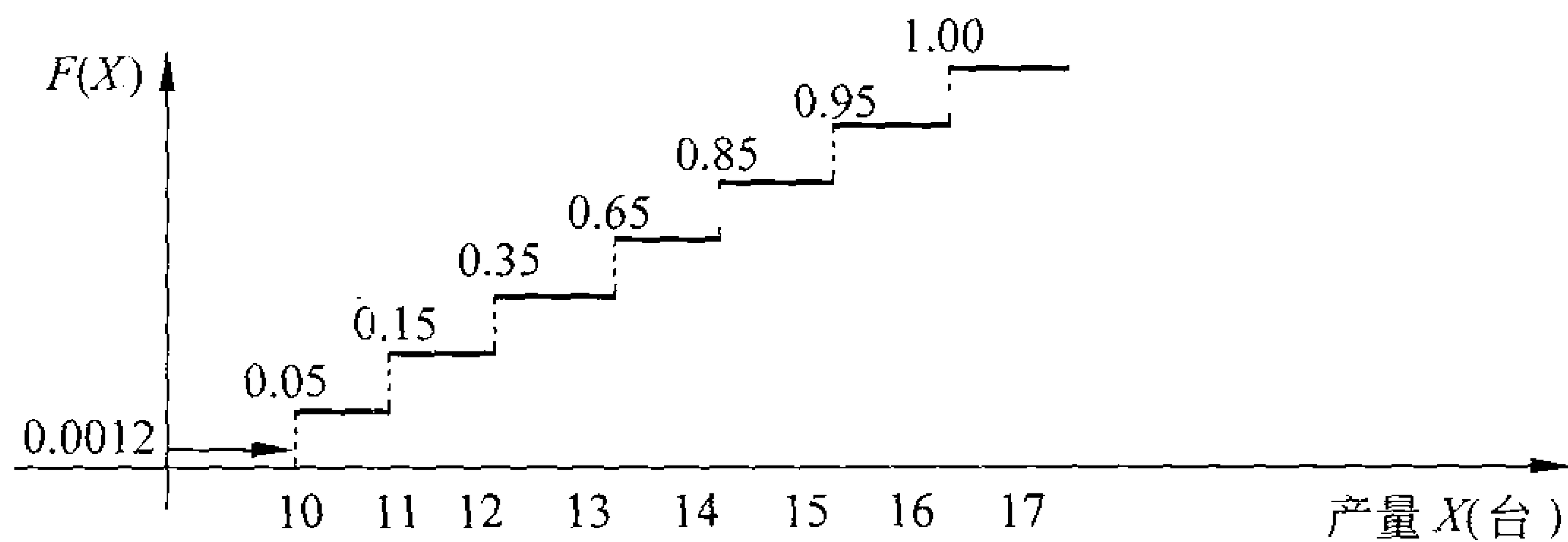
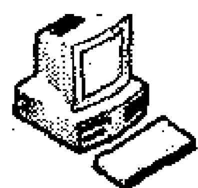


图 6-3　产量 X 的概率分布图

(1) 从附录二随机数表第 1 行第 1 个数开始连续产生 10 个随机数模拟产量，见表 6-5。



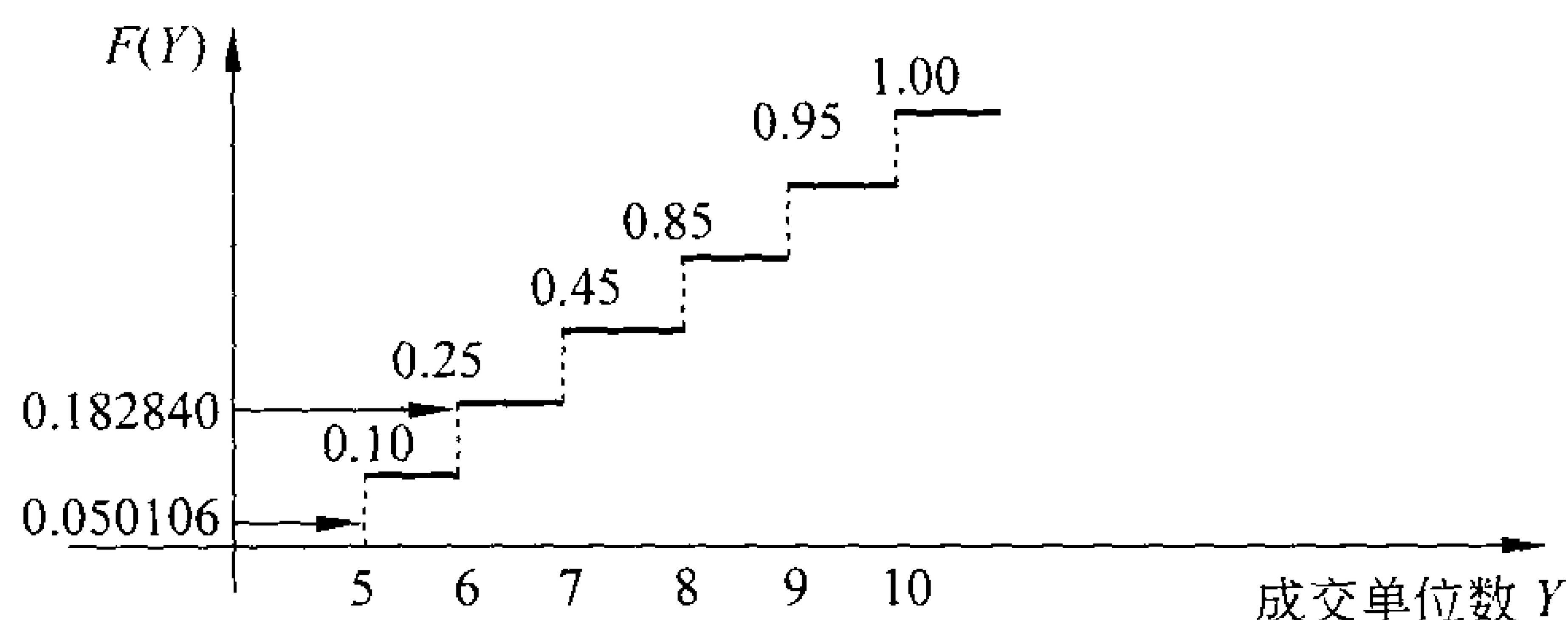


图 6-4　成交单位数 Y 的概率分布图

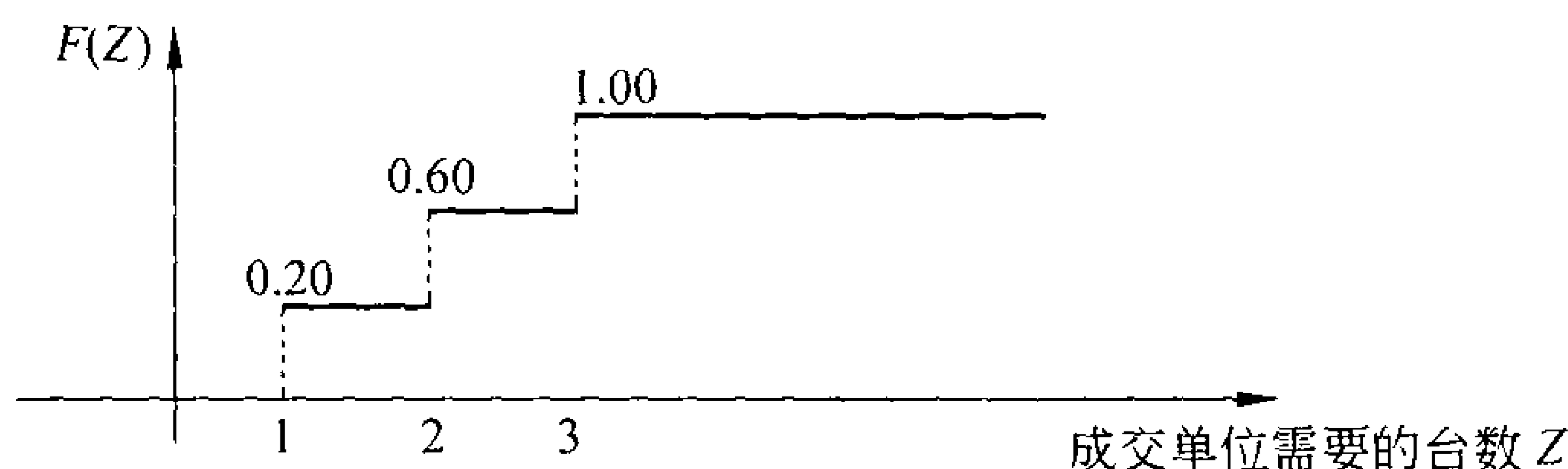


图 6-5　成交单位需要的台数 Z 的概率分布图

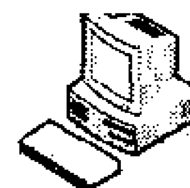
表 6-5　模拟产量 X(台)的随机数表

月	随机数	产量/台	月	随机数	产量/台
1	0.001 213	10	7	0.282 693	12
2	0.898 980	15	8	0.730 594	14
3	0.578 800	13	9	0.701 195	14
4	0.676 216	14	10	0.182 840	12
5	0.050 106	11	$\sum$		128 台
6	0.499 629	13			

(2) 从附录二随机数表最后 1 列第 1 个数开始连续产生 10 个随机数模拟成交单位数,见表 6-6。

表 6-6　模拟成交单位数 Y(个)的随机数表

月	随机数	成交单位数 Y	月	随机数	成交单位数 Y
1	0.050 106	5	7	0.517 813	8
2	0.182 840	6	8	0.433 081	7
3	0.551 702	8	9	0.908 297	9
4	0.876 167	9	10	0.369 820	7
5	0.611 683	8	$\sum$		76 个
6	0.915 126	9			



(3) 第一个月生产 10 台，成交 5 个单位，则这 5 个单位需要的机器台数用随机数来模拟。从附录二随机数最后 1 行的第 1 个数开始连续产生 5 个随机数，见表 6-7。

表 6-7　模拟成交单位需要的台数 Z(台)的随机数表

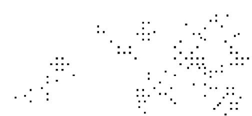
成交单位数	随机数	需要的台数
1	0.585 186	2
2	0.986 111	3
3	0.344 882	2
4	0.343 580	2
5	0.115 375	1
$\sum$		10 台

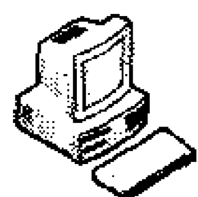
同理可得，第二个月生产 15 台，成交 6 个单位，这 6 个单位需要的台数模拟。……综合如上结果将模拟情况列表 6-8 给出。

表 6-8　综合模拟成交情况表

月	成交单位数										总需要量	总产量	缺货数	剩余数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	2	3	2	2	1	—	—	—	—	—	10	10	—	—
2	1	2	1	2	1	3	—	—	—	—	10	15	—	5
3	1	2	3	1	2	2	3	3	—	—	17	13	4	—
4	2	3	3	3	3	2	3	2	2	—	23	14	9	—
5	3	2	3	2	2	2	3	2	—	—	19	11	8	—
6	2	2	1	1	2	1	1	3	3	—	16	13	3	—
7	2	3	3	2	2	1	2	2	—	—	17	12	5	—
8	3	3	3	3	2	3	2	—	—	—	19	14	5	—
9	1	1	2	2	2	3	3	3	2	—	19	14	5	—
10	1	1	3	3	2	3	1	—	—	—	14	12	2	—
$\sum$	76 个单位										164 台	128 台	41 台	5 台

模拟结果表明：该机械厂以后 10 个月内共计生产机械设备 128 台，成交 76 个单位，共需要 164 台设备，缺货 36 台。故平均每月需增产 3.6 台才有可能满足需要。





注意：(1) 以上模拟只能反映该机械厂可能发生的一种销售情况。应该重复进行多次模拟分析决策。

(2) 应用 MATLAB 应用软件中的 Simulink 工具箱进行 MC 仿真非常方便。

对于"服务系统"的满意度、服务强度等的了解，都可以应用 MC 仿真方法方便地得到。

例 6-7 某理发店有 3 个座位(1 号位、2 号位、3 号位)，每 5 分钟进来的顾客数为 0，1 或 2 位，且进来的概率相同(都是 1/3)。顾客在每个理发椅上的服务时间是 15 或 20 分钟，且概率也相同(都是 1/2)。现在要求模拟 1 小时内，该店顾客排队或理发师空闲的情况。

解 本例要模拟顾客排队或理发师空闲的情况，而顾客排队或理发师空闲都取决于座椅被占用的情况。座椅被占用的情况又取决于进来的顾客数和顾客被服务的时间。因此，进来的"顾客数"和每个顾客"被服务的时间"是要被模拟的两个变量，分别用 X 表示进来的"顾客数"，T 表示每个顾客"被服务的时间"。

根据题意，1 小时仿真时间被分割成 12 个仿真时间段(也称为仿真步)，则：

(1) 由题意得顾客数(X)和服务时间(T)两个变量的概率及其分布，见表 6-9 及图 6-6。

表 6-9 顾客数、服务时间及其概率

顾客数(X)	概率	服务时间(T)	概　　率
0	1/3	15	1/2
1	1/3	20	1/2
2	1/3		

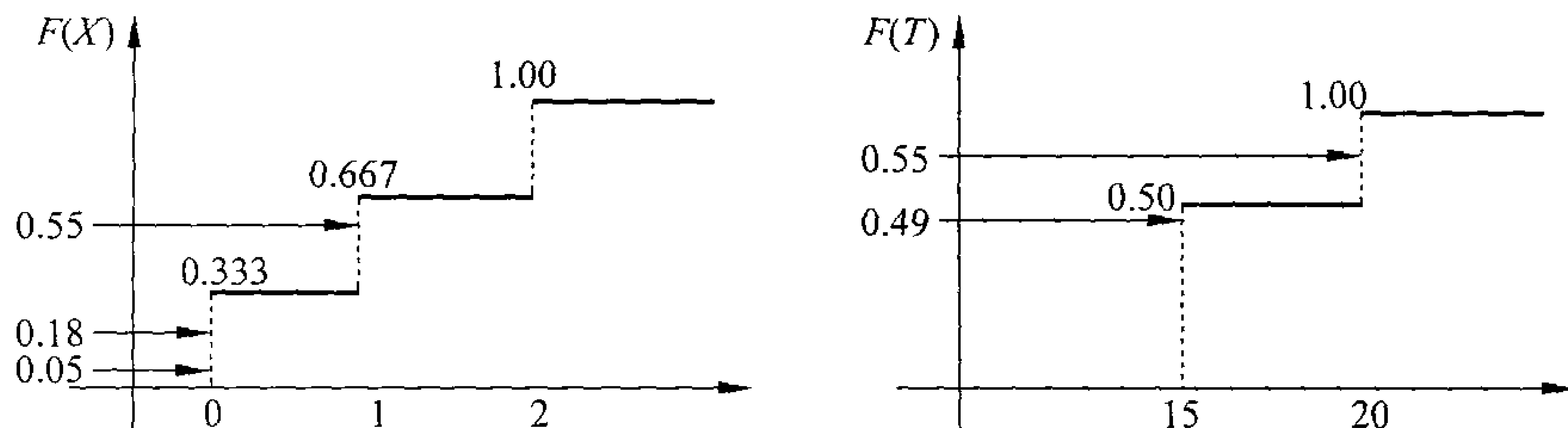
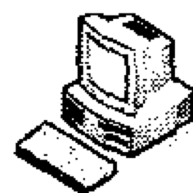


图 6-6 顾客数(X)、服务时间(T)的概率分布图

(2) 模拟进来的顾客数。从附录二随机数表的第 5 列第 1 个数开始的连续 12 个随机数(产生模拟 X 的随机数)为



0.05,0.18,0.55,0.87,0.61,0.91,0.51,0.43,0.90,0.36,0.41,0.33

模拟得到进来的顾客数(X 位)为

0,0,1,2,1,2,1,1,2,1,1,0

模拟得到每个进来的顾客需要服务的时间(T)。附录二从第 1 列第 1 个数开始的连续数为

0.00,0.49,0.10,0.55,0.09,0.76,0.03,…

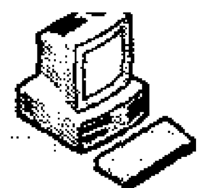
模拟得到每个进来的顾客需要服务的时间(T)为

15,15,15,20,15,20,15,…

(3) 综上,椅子占用的时间、顾客排队的时间和理发师空闲的时间模拟结果见表 6-10。

表 6-10　理发店服务繁忙程度模拟表

5 分钟分段	模拟到达顾客(X)		模拟服务时间(T)		模拟座椅占用时间			顾客排队		理发师空闲	
	随机数	顾客数	随机数	服务时间	1 号	2 号	3 号	人数	等待时间	人数	空闲时间
1(0→5 分)	0.05	0	—	—	—	—	—	—	—	3	15
2(5→10 分)	0.18	0	—	—	—	—	—	—	—	3	15
3(10→15 分)	0.55	1	0.00	15	15	—	—	—	—	2	10
4(15→20 分)	0.87	2	0.49 0.10	15 15	10	15	15	—	—	—	—
5(20→25 分)	0.61	1	0.55	20	5	10	10	1	5	—	—
6(25→30 分)	0.91	2	0.09 0.76	15 20	20	5	5	2	10	—	—
7(30→35 分)	0.51	1	0.03	15	15	15	20	1	5	—	—
8(35→40 分)	0.43	1	0.35	15	10	10	15	2	10	—	—
9(40→45 分)	0.90	2	0.94 0.19	20 15	5	5	10	4	20	—	—
10(45→50 分)	0.36	1	0.33	15	15	15	5	3	15	—	—
11(50→55 分)	0.41	1	0.15	15	10	10	20	3	15	—	—
12(55→60 分)	0.33	1	0.75	20	5	5	15	4	20	—	—
					0	0	10				
$\sum$				215				20	100	8	40



(4) 理发店服务繁忙程度分析。该理发店营业1小时中到达了13位顾客,1小时后没有得到服务的顾客有4位;1小时中顾客应该被服务的总时间为215分钟,但实际被服务的时间是150分钟,还有75分钟顾客没有得到服务,即有一半的时间没有提供服务,说明服务时间过分饱满;1小时中3位理发师共空闲40分钟,顾客排队等待20人次,共排队100分钟。

这是一次模拟结果,如果多次模拟结果均呈现这样的状况,则说明该理发店服务强度还是比较大的。

2. 离散系统-均匀分布-MC仿真

例6-8 某工厂从外地采购原料,到货的天数(指从订货到到货的间隔天数)是一个随机变量(设为 X)。根据过去的资料,在100次到货中,到货天数与到货次数的关系如表6-11所示。

表6-11 到货天数 X 与到货次数的关系表

到货天数 X	2	3	5	7	8	12
到货次数	20	40	8	25	5	2

现模拟今后10批货物到达的平均天数。

解 (1) 根据已知条件,到货天数 X 的概率见表6-12。

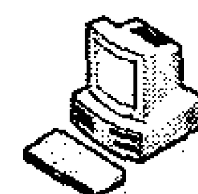
表6-12 到货天数 X 的概率表

到货天数 X	2	3	5	7	8	12
概率 P	0.20	0.40	0.08	0.25	0.05	0.02
对应随机数	00～19	20～59	60～67	68～92	93～97	98～99

由表6-12可见,从未出现过4天或6天或9,10,11天的到货情况,因此,变量X(到货天数)不服从均匀分布,这时不能直接使用均匀分布的随机数来模拟,需要进行变换。

(2) 变换。到货天数为2天的概率是0.20,则用均匀分布随机数00～19这20个随机数表示这一样本;到货天数为3天的概率是0.40,则用均匀分布随机数20～59这40个随机数表示这一样本;到货天数为4天的概率是0,则表示这一样本的均匀分布随机数为0个;到货天数为5天的概率是0.08,则用均匀分布随机数60～67这8个随机数表示这一样本。以此类推,得表6-12的第3行。

(3) 产生均匀分布的随机数模拟到货天数。从附录一第21行起按行读出10个随机数:



68,34,30,13,70,55,74,30,77,40

模拟到货天数为

7,3,3,2,7,3,7,3,7,3

(4) 10 批平均到货天数：

$$\bar{T} = 45/10 = 4.5(\text{天})$$

MC 仿真方法在市场经济中的应用也越来越广。下面介绍一个市场营销的 MC 仿真案例。

例 6-9　已知某商场销售某商品情况如表 6-13 所示。商店向工厂订货，每次订货到达天数情况如表 6-14 所示。该商场盈利情况为：每出售一台获利 20 元，每库存一台损失 0.5 元/天。现在该商场一个月 30 天经营初步决策是：月初存 300 台，每当库存等于或小于 300 台时即向工厂订货，订货量 300 台/次，但在上次订货未到达之前不再继续订货。现用 MC 方法探讨这一决策 30 天内给该商场带来的盈利、可能的损失，并讨论如何改进决策使盈利更大。

表 6-13　某商品销售情况表

每天销售量/台	70	75	80	85	90	95	100	105	110	120
次数	5	5	10	10	15	15	20	15	10	5

表 6-14　订货-到货情况表

到达天数	2	3	4	6	8	12
次数	20	30	40	20	5	5

解　(1) 根据已知条件，由例 6-8 方法得到每天销售量 X 与到货天数 Y 的概率见表 6-15(a)和表 6-15(b)。

表 6-15(a)　每天销售量 X 的概率表

每天销售量 X	概率 P	对应的随机数	每天销售量 X	概率 P	对应的随机数
70	0.04	00～03	95	0.14	40～53
75	0.04	04～07	100	0.19	54～72
80	0.09	08～16	105	0.14	73～86
85	0.09	17～25	110	0.09	87～95
90	0.14	26～39	120	0.04	96～99

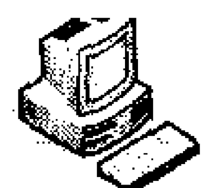


表 6-15(b) 到货天数 Y 的概率表

到货天数 Y	2	3	4	6	8	12
概率 P	0.17	0.25	0.33	0.17	0.04	0.04
对应的随机数	00～16	17～41	42～74	75～91	92～95	96～99

(2) 变换：见表 6-15(a)的第 3 列和表 6-15(b)的第 3 行。

(3) 模拟销售量 X。从附录一例如第 21 行起按行读出 30 个随机数：

68,34,30,13,70,55,74,30,77,40,44,22,78,84,26,04,33,46,09,
52,68,07,97,06,57,74,57,25,65,76

模拟对应的销售量为

100,90,90,80,100,100,105,90,105,95,95,85,105,105,90,75,90,95,
80,95,100,75,120,75,100,105,100,85,100,105

模拟到货天数 Y。从附录一第 21 行起按行读出几个(模拟的天数和为 30)随机数：

68,34,30,13,70,55,74,30,77

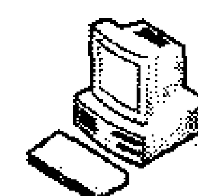
到货天数模拟为

4,3,3,2,4,4,4,3,6(和为 30 天)

模拟情况见列表 6-16。

表 6-16 商场某商品销售模拟表

天次	备货数量	售货数量	存货数量	获利	库存损失	盈利	订货	到货	该得盈利被损失
							次/天	次	
1	300	100	200	1 000	20	980	①/4		
2	200	90	110	900	11	889			
3	110	90	20	900	2	898			
4	20	80	0	200	0	200			(80－20)＝600
5	0	100	0	0	0	0		①	1 000
6	0＋300	100	200	1 000	20	980	②/3		
7	200	105	95	1 050	9.5	1 040.5			
8	95	90	5	900	0.5	899.5			
9	5	105	0	50	0	50		②	(105－5)×10＝1 000
10	0＋300	95	205	950	20.5	929.5	③/3		
11	205	95	110	950	11	939			

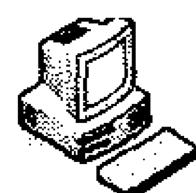


续表

天次	备货数量	售货数量	存货数量	获利	库存损失	盈利	订货	到货	该得盈利被损失
							次/天	次	
12	110	85	25	850	2.5	847.5			
13	25	105	0	250	0	250		③	(105－25)×10＝800
14	0＋300	105	195	1050	19.5	1 030.5	④/2		
15	195	90	105	900	10.5	889.5			
16	105	75	30	750	3	747		④	
17	30＋300	90	240	900	24	876			注意：该天＞300，不订货
18	240	95	145	950	14.5	935.5	⑤/4		
19	145	80	65	800	6.5	793.5			
20	65	95	0	650	0	650			(95－65)×10＝300
21	0	100	0	0	0	0			100×10＝1 000
22	0	75	0	0	0	0		⑤	75×10＝750
23	0＋300	120	180	1 200	18	1 182	⑥/4		
24	180	75	105	750	10.5	739.5			
25	105	100	5	1 000	0.5	999.5			
26	5	105	0	50	0	50			(105－5)×10＝1 000
27	0	100	0	0	0	0		⑥	1 000
28	0＋300	85	215	850	21.5	829.5	⑦/4		
29	215	100	115	1 000	11.5	988.5			
30	115	105	10	1 050	1	1 049			
$\sum$		2 835				20 863			7 450

(4) 仿真结果分析。经表 6-16 可见，该月订货 7 批，实际到货 6 批，共有货 300×6＋300＝2 100 台，月底库存 10 台。模拟显示，本月应该销售 2 835 台，其间因缺货实际只销售了 2 100 台，损失了 735 台，损失掉的盈利共计 7 450 元，占总盈利的 35%。完全缺货 3 天，完全没有盈利 4 天。

继续模拟，看其仿真结果。如果模拟结果显示盈利被损失较大，则可以改进。如改变进货量仿真效果，选择一个较好的可能方案使得盈利更大。



3. 连续系统-正态分布-MC 仿真

仍然以市场营销为例，对其进货、售货、盈利的情况进行模拟。

例 6-10 某超市经销台灯，根据以往记录，每天平均销售 100 台，每月销售量在 70～130 台之间约有 20 天。现用 MC 方法模拟今后一个月(30 天)每天的销售情况。

解 (1) 根据已知条件，销售量 $X \sim N(100, 30^2)$。

(2) 变换。从附录一第 10 行起横读 30 个均匀分布的随机数。

$$\{a\}: 0.57, 0.60, 0.86, \cdots, 0.07, 0.92, 0.45$$

将均匀分布的随机数变换(查标准正态分布表)到标准正态分布的随机数。例如，正态分布的分布函数 $F(0.18)=0.57, \cdots$，所以得标准正态分布随机数列。

$$\{u\}: 0.18, 0.25, 1.08, \cdots, -1.47, 1.41, -0.13$$

再将标准正态分布随机数列 $\{u\}$ 变换到 $\mu=100, \sigma=30$ 的正态分布随机数列。

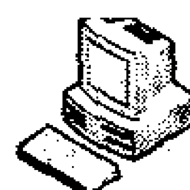
由 $u=\frac{t-\mu}{\sigma}=\frac{t-100}{30}$ 得 $t=30u+100$，对应 $\{u\}$ 得

$$\{t\}: 106, 108, 133, \cdots, 56, 142, 97$$

(3) 模拟情况见表 6-17。

表 6-17 台灯销售量的盈利情况模拟表

天次	均匀随机数	标准正态随机数	$(100,30^2)$正态随机数(模拟销售量)	方差	天次	均匀随机数	标准正态随机数	$(100,30^2)$正态随机数(模拟销售量)	方差
	a	u	T			a	u	T	
1	0.57	0.18	106	100	16	0.90	1.28	139	1 849
2	0.60	0.25	108	144	17	0.52	0.05	102	36
3	0.86	1.08	133	1 369	18	0.84	0.99	130	1 156
4	0.32	−0.47	87	121	19	0.77	0.74	123	729
5	0.44	−0.15	96	0	20	0.27	−0.61	82	196
6	0.09	−1.34	60	1 296	21	0.08	−1.41	58	1 444
7	0.47	−0.08	98	4	22	0.02	−2.05	39	3 136
8	0.27	−0.61	82	196	23	0.73	0.61	119	529
9	0.96	1.76	153	3 249	24	0.43	−0.18	95	1
10	0.54	0.10	103	49	25	0.28	−0.58	83	169
11	0.49	−0.02	100	16	26	0.18	−0.91	73	529
12	0.17	−0.95	72	576	27	0.18	−0.91	73	529
13	0.46	−0.10	98	4	28	0.07	−1.47	56	1 600
14	0.09	−1.34	60	1 296	29	0.92	1.41	142	2 116
15	0.62	0.31	110	196	30	0.45	−0.13	97	1



(4) 模拟分析。模拟所得平均每天销售 96 台,标准差是 28。与期望值相差不大。

例 6-10 也可以直接用附录三给的正态分布的随机数来模拟。

综上,不论是离散型还是连续型随机变量,也不论是均匀分布还是正态分布,总可以从均匀分布的随机数中找到依照所需分布的随机数来模拟。

6.5　蒙特卡罗系统仿真的应用

旅游资源、旅游设施、旅游服务是构成旅游业的三大要素,三者构成有机整体。上海旅游资源的特色是:人文资源相对比较集中,现代化、海派文化建筑特色显著,人文资源和社会资源方方面面都渗透着上海都市旅游的魅力,从而形成了上海自己独特的旅游吸引力。

1. 上海旅游服务系统及顾客满意度模型

旅游业包含交通、娱乐、购物、餐饮、住宿、游览等要素。而旅游服务系统要素亦与这六要素息息相关,因此旅游服务系统可以认为由游览服务、交通服务、娱乐服务、购物服务、餐饮服务、住宿服务六大服务要素构成。其中游览服务包括旅行社服务、导游服务、观光、建筑等和游览相关的所有服务;交通服务指的是交通的便利性、安全性等和交通相关的所有服务;其他四大服务同理。旅游服务系统构成见图 6-7。

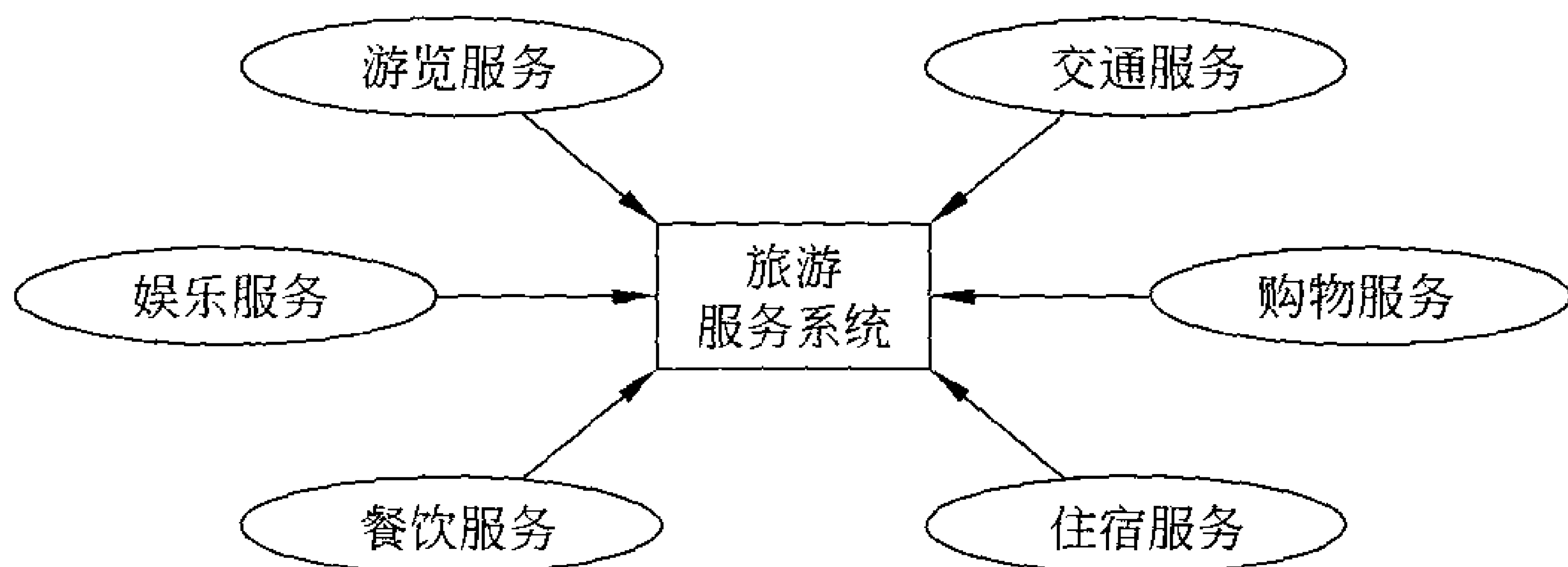
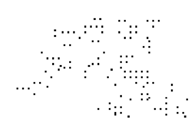


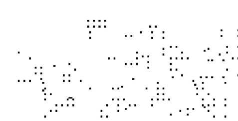
图 6-7　旅游服务系统要素构成图

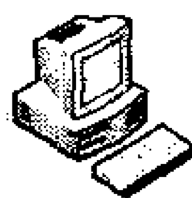
顾客满意度(customer satisfaction index,CSI)是指顾客购买产品后所产生的满足状态和程度,一般通过顾客满意度指数来衡量,利用顾客满意度指数体系测量和计算顾客满意度具有诸多优点。以交通服务等六项指标,建立旅游服务系统顾客满意度数学模型:

$$\text{TSCSI} = \sum_{i=1}^{6} X_i Y_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

式中:变量 X_i,Y_i(i=1,2,3,4,5,6)分别表示交通服务等六要素的满意度得分及权重得分;TSCSI 表示旅游服务系统顾客满意度得分。







2. TSCSI 原始数据的收集和整理

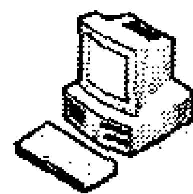
设计调查问卷对游客进行访问以获得上海旅游服务系统中所需数据，让被访者对各指标的重要度以及指标进行打分，各指标重要度原始分值为 A_i，$i=1,2,3,4,5,6$。归一化权重 Y_i 的计算式为

$$Y_i = \frac{A_i}{\sum A_i}$$

TSCSI 各要素指标分值为 5 个档次打分，分别为 2，4，6，8，10。关于 TSCSI 的各指标均值和方差以及权重的均值和方差，表 6-18 为部分数据。

表 6-18　TSCSI 各指标权重和满意度打分情况(部分)

数　据	交　通		游　览		餐　饮	
	X_1	Y_1	X_2	Y_2	X_3	Y_3
01	8	0.184	10	0.184	8	0.163
02	6	0.173	8	0.173	10	0.173
03	8	0.231	4	0.256	8	0.128
04	6	0.2	8	0.178	8	0.156
05	8	0.238	8	0.167	6	0.167
06	8	0.204	10	0.204	8	0.163
07	8	0.17	8	0.191	10	0.17
08	8	0.157	6	0.196	10	0.157
09	8	0.2	10	0.178	6	0.222
10	10	0.149	6	0.17	8	0.191
11	6	0.163	10	0.184	8	0.184
12	10	0.176	8	0.157	8	0.176
13	8	0.192	8	0.192	6	0.154
14	10	0.191	10	0.149	8	0.17
15	6	0.191	8	0.191	10	0.17
16	8	0.195	6	0.171	8	0.171
17	10	0.173	10	0.192	8	0.173
18	10	0.14	8	0.18	10	0.16



续表

数　据	交　　通		游　　览		餐　　饮	
	X_1	Y_1	X_2	Y_2	X_3	Y_3
19	8	0.2	6	0.225	8	0.15
20	8	0.185	10	0.167	8	0.167
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
均值	8.2	0.185	7.9	0.186	8.0	0.167
方差	1.5	0.000 45	3.03	0.000 50	1.21	0.000 27

由表 6-18 可知，每位被访者对于指标的重要程度的看法不一，且 X_i，Y_i 是通过调查得到的，因此 X_i，Y_i 是随机变量，且旅游服务满意度 TSCSI 显然亦是随机变量。

3. TSCSI 系统仿真变量的概率分布确定

确定 X_i，Y_i 的概率分布，是用蒙特卡罗仿真方法对上海旅游服务系统的总体满意度进行仿真的前提和基础。本例采用直方图法结合点估计来确定旅游服务系统的满意度指标得分 X_i 及满意度指标权重 Y_i 的概率分布。根据对数据直方图的观察，X_i 与 Y_i 近似于正态分布（证明省略）。

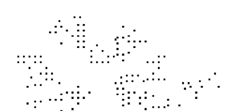
4. TSCSI 仿真

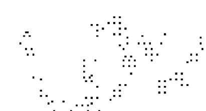
以指标得分 X_i 及指标的权重 Y_i 作为输入变量，上海旅游服务系统的满意度 TSCSI 为系统输出，得到 Simulink 仿真图（如图 6-8 所示）。

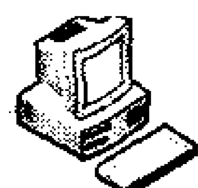
R-X_i 分别为产生 X_i 的子模块，由 Product 模块分别计算各服务满意度得分 X_i 和 Y_i 的乘积，再由 sum 模块把 6 个计算结果相加得到的即为服务系统总体满意度 TSCSI。

仿真模型图 6-9 中产生 Y_i 的模块 Subsystem，功能是实现归一化权重 Y_i 的仿真计算，由 6 个抽取随机数模块、2 个数学计算模块以及 Mux 模块组成，名为 R_i 的模块分别模拟调查问卷中被访者对于交通、游览等 6 个指标重要度的打分情况进行随机数的抽取，对应地产生被访者对各指标重要度的打分 A_i 等数值输出，经由 Mux 模块使这 6 个输出值合并成为一个向量输出，通过 sum 把向量中的元素相加求得 $\sum A_i$，然后同时把 sum 模块的计算结果和 A_i 向量输入到 Product 模块中，实现归一化权重 Y_i 的计算。图 6-8 中 R-X_1 模块为产生正态分布随机数的模块，其模块参数 Mean 设置为 8.2，Variance 设置为 1.5，数据来自调查问卷的数据统计 X_1 的样本均值和方差（见表 6-18）。

所有参数设置完毕，即可运行仿真模型。仿真计算 1 500 次，输出结果为 TSCSI 的 1 500 次计算结果，以 yout 为数组名存放在工作空间中，并求得 TSCSI 的方差。上海旅游服务系统的顾客满意仿真结果的均值为 7.757 9，方差为 1.976 3，并绘出 TSCSI 的直方







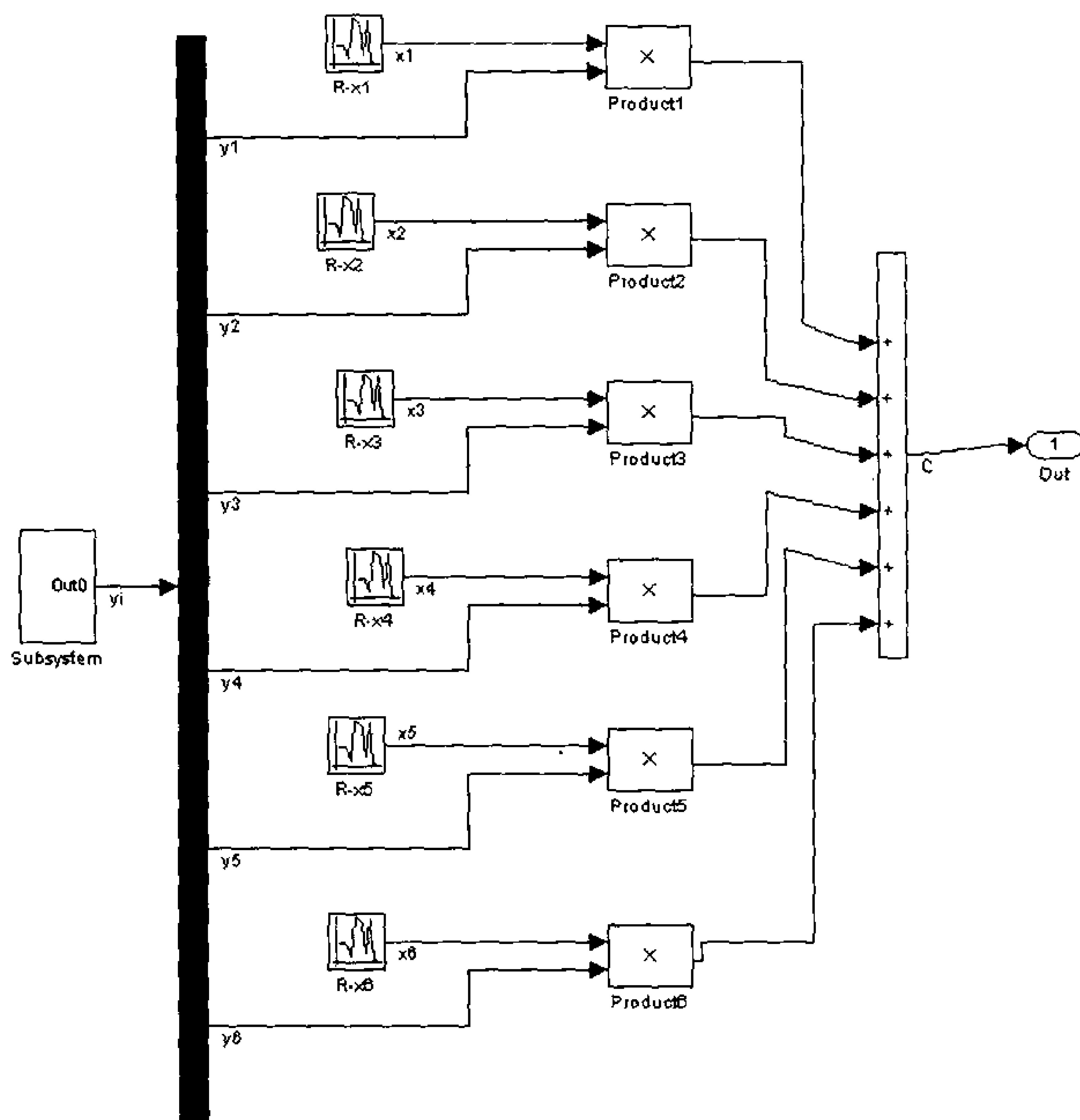


图 6-8　TSCSI 的 Simulink 仿真模型图

图，见图 6-10。

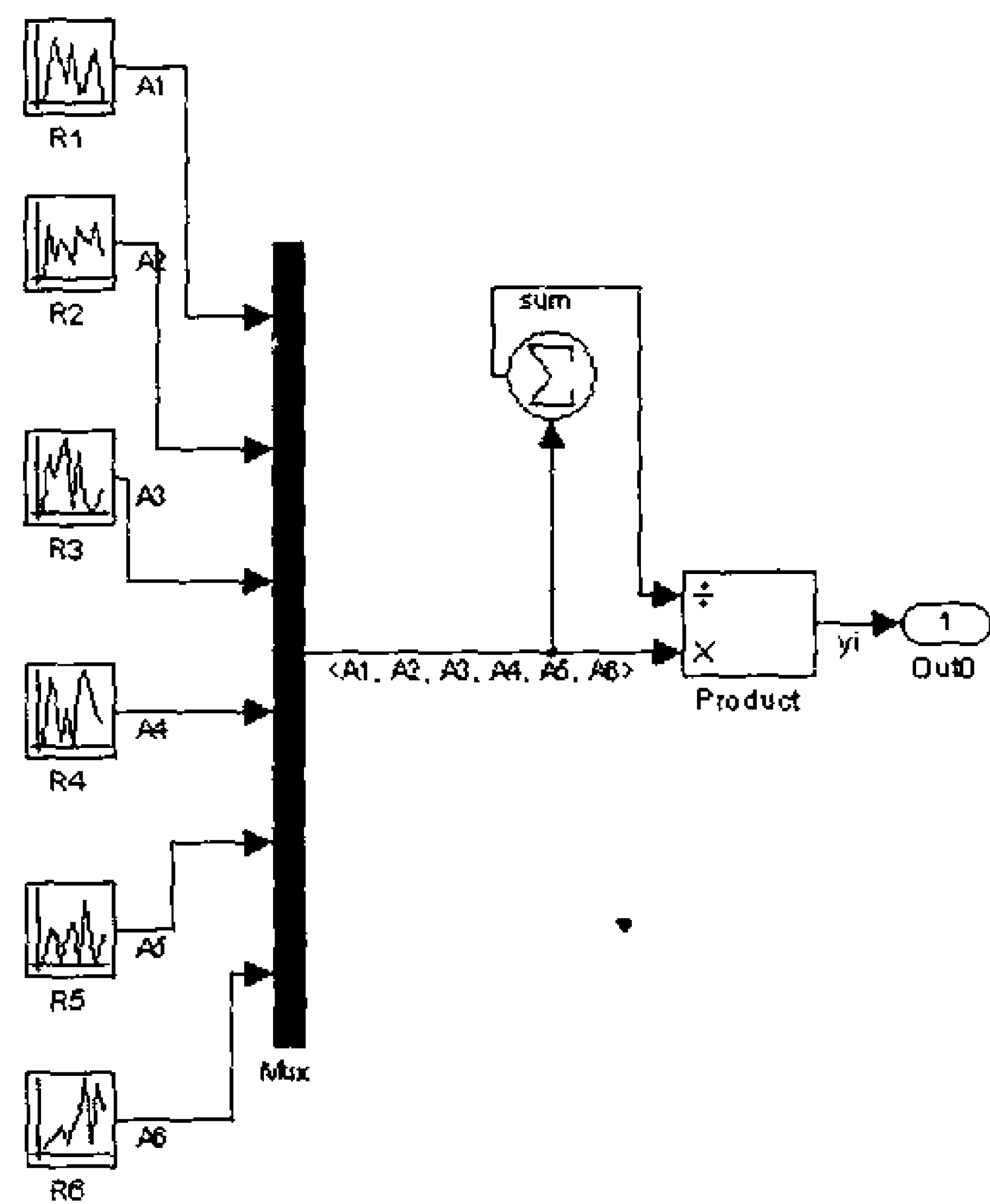


图 6-9　子系统 Subsystem 的模型图

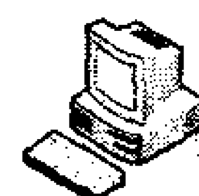
5. 结论

上海旅游服务权重得分 Y_i 以及服务满意度得分 X_i 都近似服从于正态分布，服务系统总体满意度也可认为近似于服从正态分布。上海旅游服务系统的满意度仿真结果均值为 7.757 9，方差为 1.976 3，所以目前上海旅游服务系统的顾客满意度评价接近“较满意”的程度。评价结果不排除取值或计算过程中可能存在的误差导致评价结果的误差。本例通过对上海旅游服务系统的顾客满意度进行仿真，对其现状进行评价，所建仿真模型在理论上具有一定科学性和合理性，在应用上具有广泛性和可操作性，其结果对于上海发展旅游业具有一定参考作用。

例 6-11　运用蒙特卡罗方法建立生产流水线的仿真模型。

一个生产流水线作业安排问题如图 6-11 所示。

当原料运送到 Q 作业点时，在 Q 作业点进行加工；当 Q 把加工成的半成品以 0.1 分



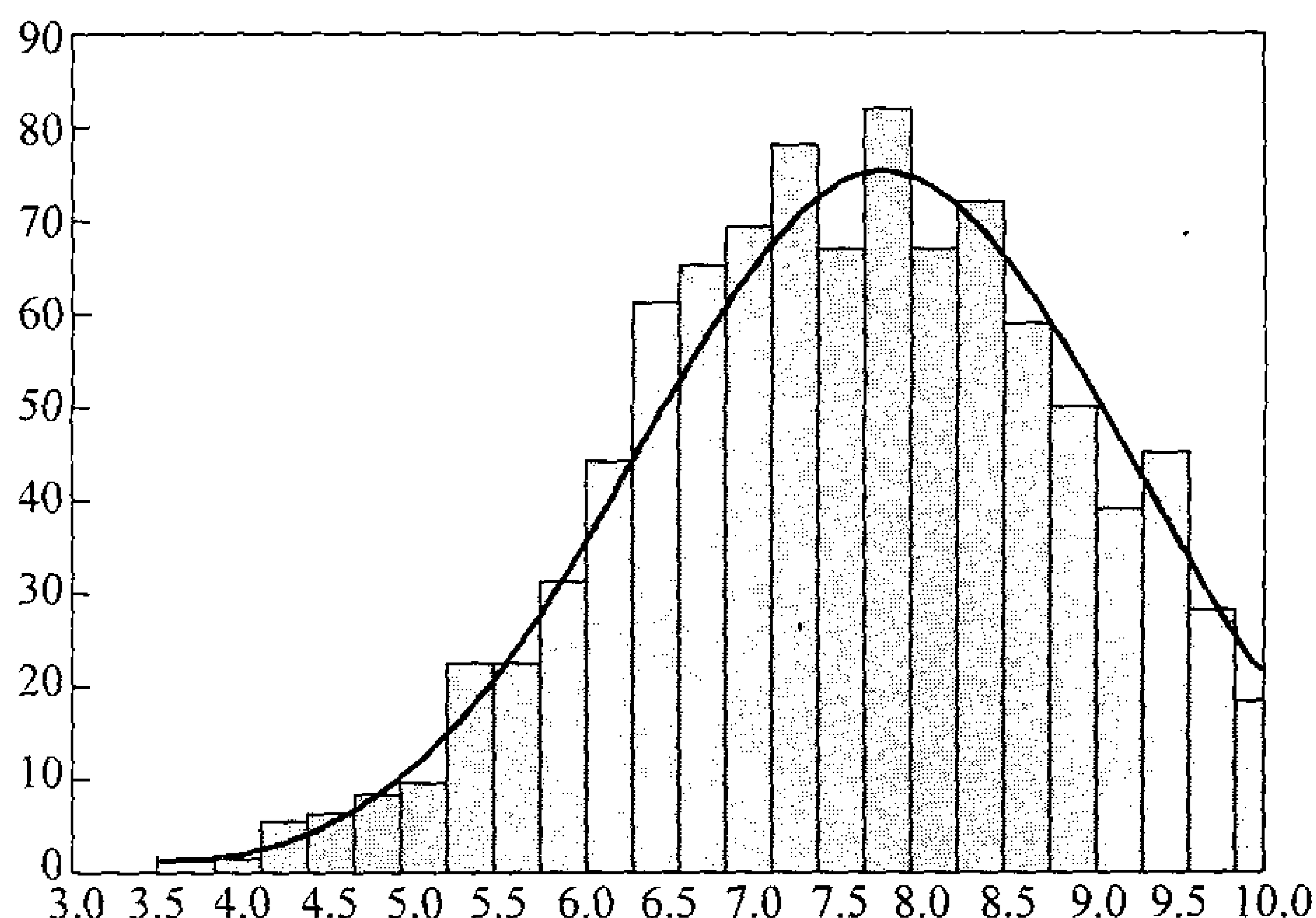


图 6-10　上海旅游服务系统的游客满意度仿真结果直方图

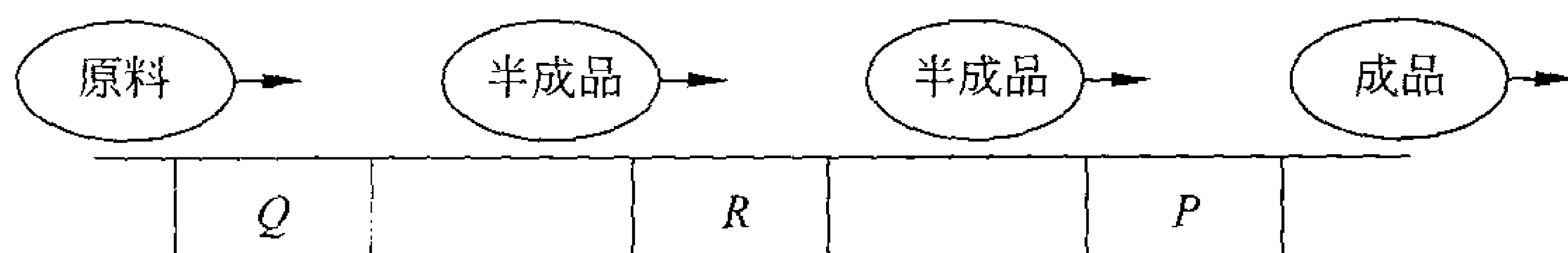


图 6-11　生产流水线作业安排流程图

钟/个运送到作业点 R 时，在 R 作业点继续进行加工；当 R 同样把加工的半成品以 0.1 分钟/个运送到作业点 P 时，再在 P 作业点进行加工；最后由 P 作业点加工成成品。

关于 Q,R,P 三个作业点的工作情况，过去的统计资料如图 6-12 所示。

根据以上统计数据，用计算机仿真模型，模拟流水线工作情况：

(1) 计算生产流水线 R,P 的空闲时间。

(2) 计算 R,P 点半成品积压时间。

(3) 计算 R,P 点半成品积压量。

(4) 计算 R,P 点生产效率。

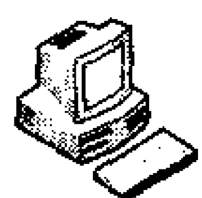
(5) 计算流水线生产效率。

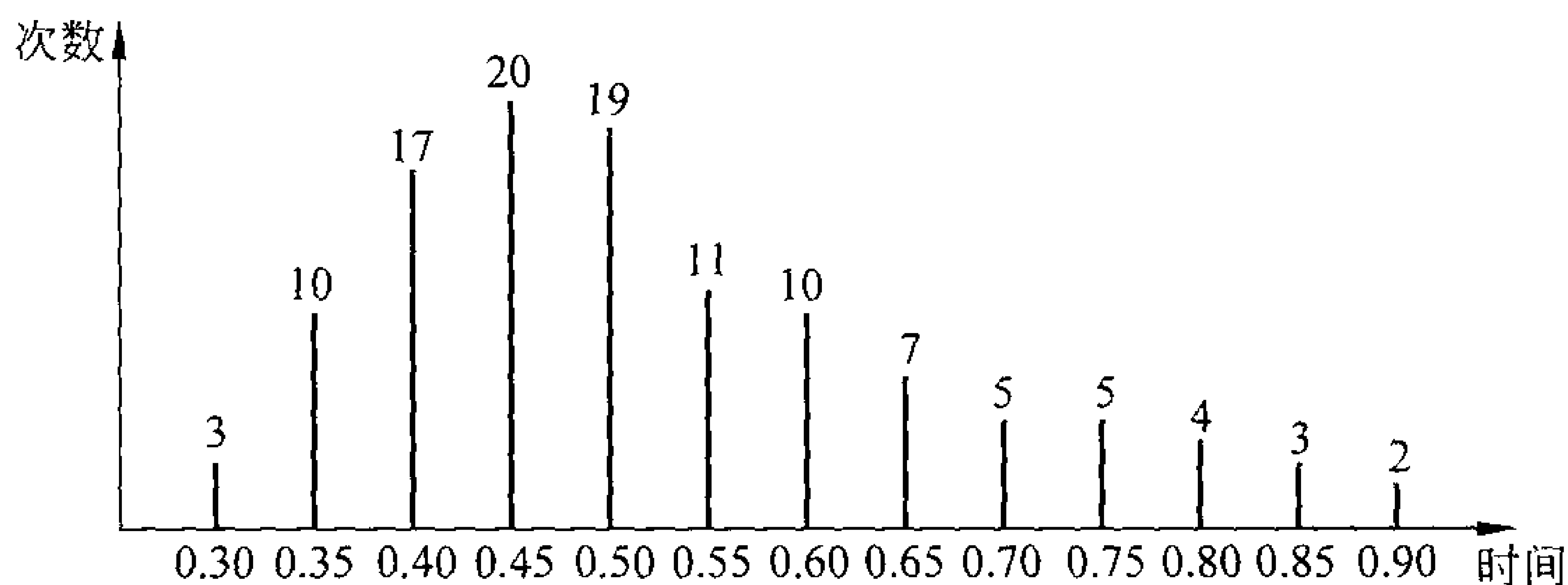
(6) 计算分析流水线作业安排的一般规律。

本流水线仿真模型一次仿真 200 个零件，共仿真 10 次。软件环境是 VB 6.0。仿真结果如图 6-13 所示。

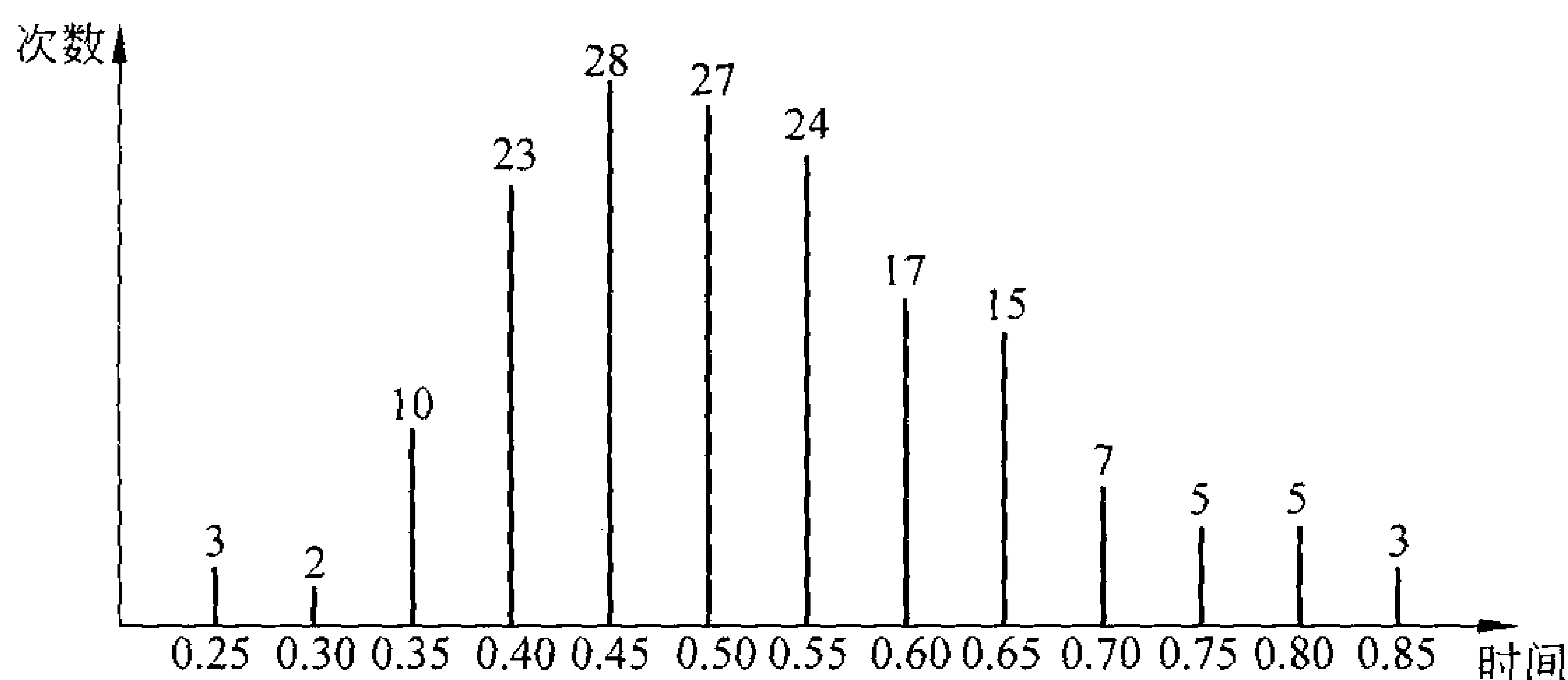
以上是 10 次模拟的结果。从数据中可以看出，此种流水线的安排效率较低。流水线总效率低下，每个零件多数情况下要花费 4 分钟以上时间，个别情况达到 8 分钟以上。

Q 工作点的效率非常高而且很均匀，都在每个零件 0.5 分钟左右浮动。R 工作点的效率却很低，大多数情况下几乎是 Q 工作点的两倍之多，从数据上分析导致这个结果的

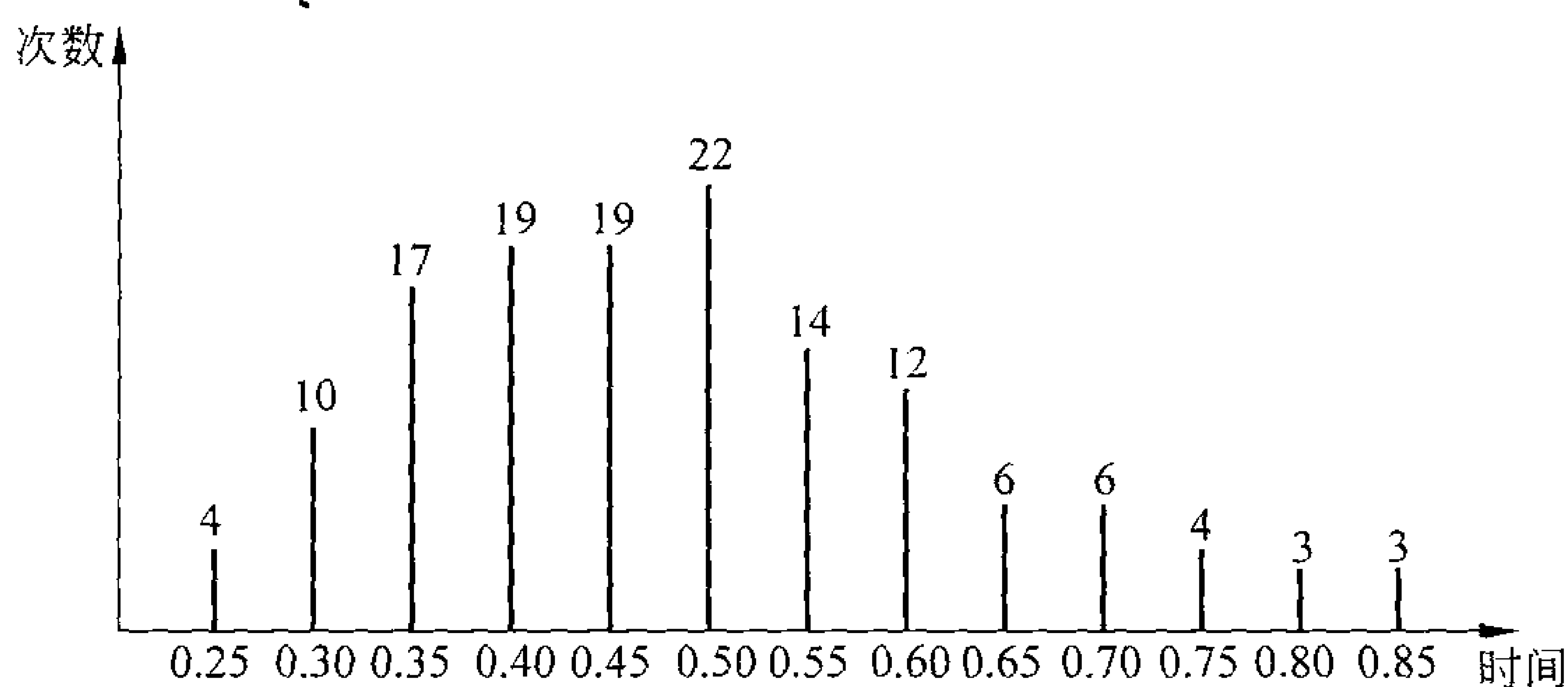




(a) Q 工作点统计数据



(b) R 工作点统计数据

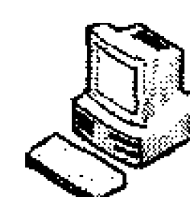


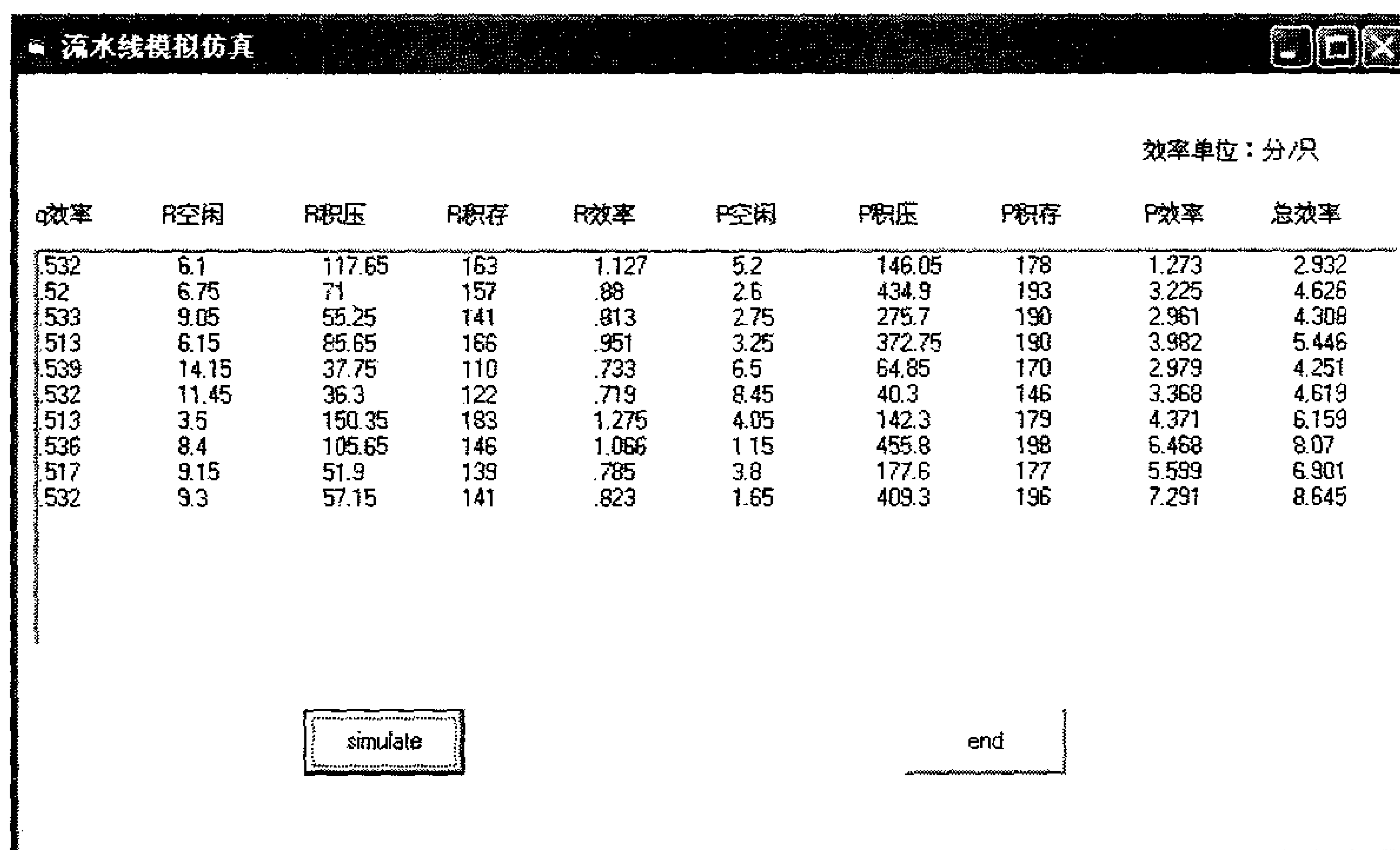
(c) P 工作点统计数据

图 6-12

原因是因为 R 点的积压时间过多,图 6-13 中有 8 次的数据达到 50 分钟以上。再将 R 工作点的积压时间和空闲时间对比一下,发现积压时间远大于空闲时间,反映出 R 点工作速度慢使得产品大量积压。因此,R 点形成整个模型运行的瓶颈。由此又导致了 P 点的积压时间恶性膨胀,最终造成了整个流水线效率的低下。

鉴于以上分析,要提高整个流水线的工作效率,必须解决模型中的瓶颈问题。具体做法包括:将 R 工作点放到工作相对轻松的第一个位置上;以 0.2 分钟的时间间隔运输半成品,取代原来的 0.1 分钟的时间间隔,仿真结果如图 6-14 所示。当然,延长了运输时间

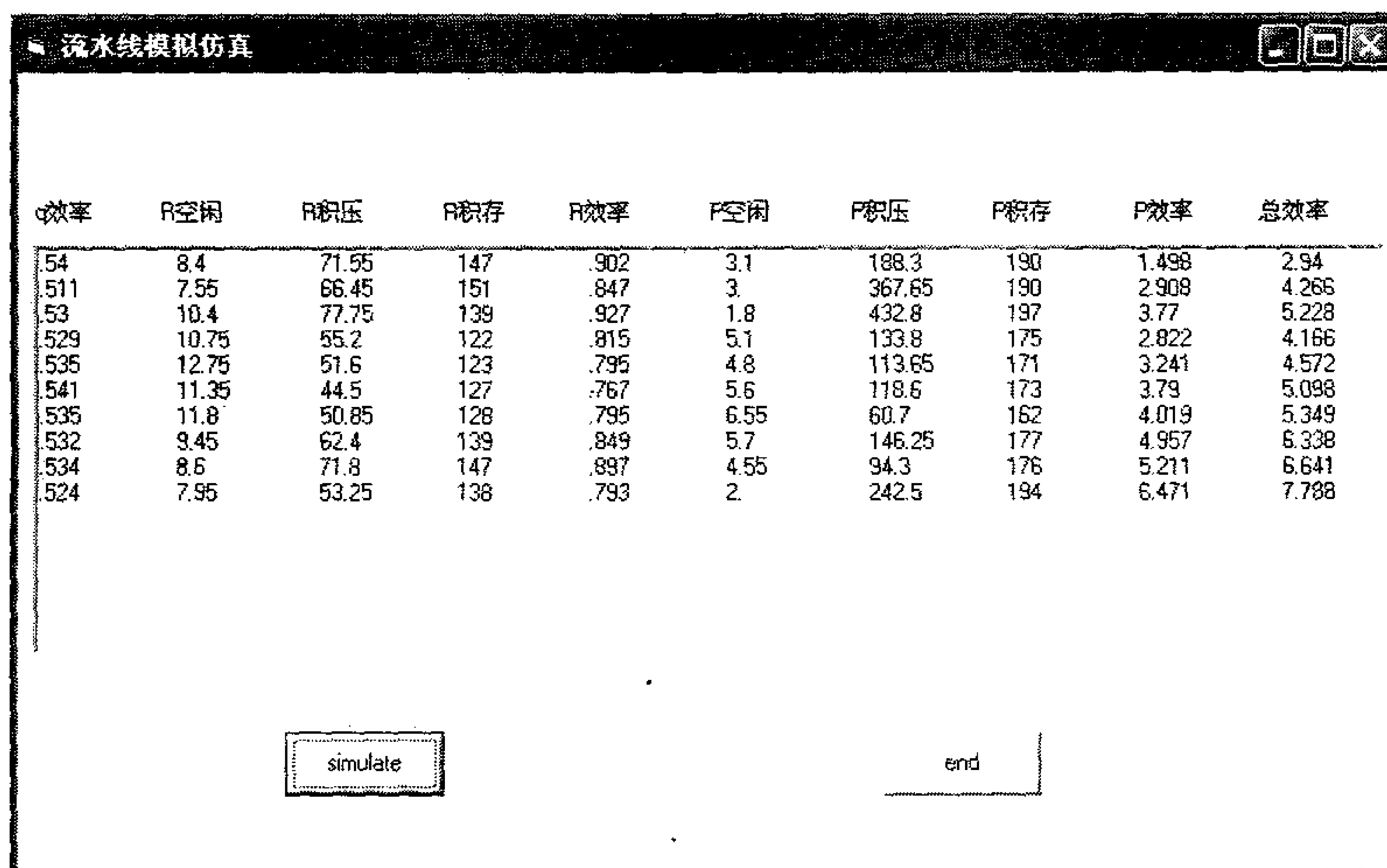




q效率	R空闲	R积压	R积存	R效率	P空闲	P积压	P积存	P效率	总效率
.532	6.1	117.65	163	1.127	5.2	146.05	178	1.273	2.932
.52	6.75	71	157	.88	2.6	434.9	193	3.225	4.626
.533	9.05	55.25	141	.813	2.75	275.7	190	2.961	4.308
.513	6.15	85.65	166	.951	3.25	372.75	190	3.982	5.446
.539	14.15	37.75	110	.733	6.5	64.85	170	2.979	4.251
.532	11.45	36.3	122	.719	8.45	40.3	146	3.368	4.619
.513	3.5	150.35	183	1.275	4.05	142.3	179	4.371	6.159
.536	8.4	105.65	146	1.066	1.15	455.8	198	6.468	8.07
.517	9.15	51.9	139	.785	3.8	177.6	177	5.599	6.901
.532	9.3	57.15	141	.823	1.65	409.3	196	7.291	8.645

图 6-13　流水线仿真模型一次仿真结果

也会使空闲时间增加而降低总体效率。因此，实际运用时，可以根据实际需要采取相应措施，其预测结果可以通过模型模拟得到，以供参考。

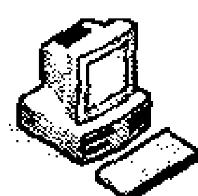


q效率	R空闲	R积压	R积存	R效率	P空闲	P积压	P积存	P效率	总效率
.54	8.4	71.55	147	.902	3.1	188.3	190	1.498	2.94
.511	7.55	66.45	151	.847	3.	367.65	190	2.908	4.266
.53	10.4	77.75	139	.927	1.8	432.8	197	3.77	5.228
.529	10.75	55.2	122	.815	5.1	133.8	175	2.822	4.166
.535	12.75	51.6	123	.795	4.8	113.65	171	3.241	4.572
.541	11.35	44.5	127	.767	5.6	118.6	173	3.79	5.098
.535	11.8	50.85	128	.795	6.55	60.7	162	4.019	5.349
.532	9.45	62.4	139	.849	5.7	146.25	177	4.957	6.338
.534	8.6	71.8	147	.897	4.55	94.3	176	5.211	6.641
.524	7.95	53.25	138	.793	2.	242.5	194	6.471	7.788

图 6-14　运输时间为 0.2 分钟的模拟仿真图

本章小结

系统仿真又称为系统模拟分析，是系统分析的重要方法，是对实际系统进行试验研究的过程，即利用模型来模拟事物发展变化的规律。系统仿真也可以认为是通过建立和运



行实际系统的仿真模型，来模仿系统的运行状态和规律，以实现在计算机上进行试验的全过程。因此，这个过程应尽量能够反映系统的主要特征。

蒙特卡罗仿真是一种特殊的数值计算仿真方法，该方法是以概率论和数理统计理论为指导的模拟方法，它是充分利用计算机计算能力的随机试验方法。

在系统工程设计中，定量模型的建立往往不能为制定决策提供充分的信息，甚至可能会导致严重的数学错误。而建立包含不确定因素的模型是一个非常复杂的过程，蒙特卡罗仿真模型即是一种常用的包含不确定因素的仿真模型，也是常用的系统工程分析方法。该方法可以利用计算机的功能，避免系统工程设计中直接考虑不确定性因素时所遇到的数学难题。

思考题

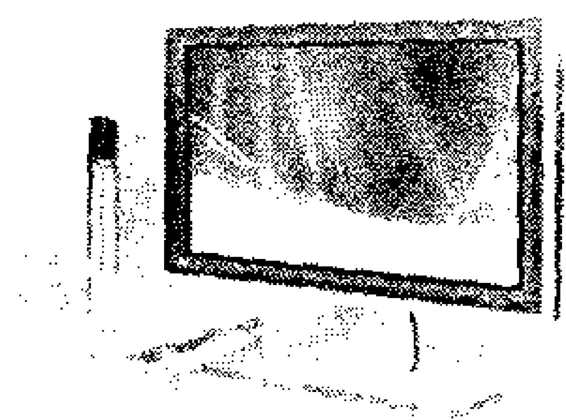
1. 系统仿真的一般步骤包括哪些？

2. 常用的产生随机数的方法有哪些？在计算机领域中，如何产生随机数？

3. 如何利用随机数法既简便又好、又快地将 2 000 位同学随机平均分成 5 个小组？

4. 已知某商场销售某商品情况如表 6-13；商店向工厂订货，每次订货到达天数情况如表 6-14；该商场盈利情况为：每出售一台获利 20 元，每库存一台损失 0.5 元/天。现在该商场一个月 30 天经营初步决策是：月初存 300 台，每当库存等于或小于 300 台时向工厂订货，订货量 300 台/次，但在上次订货未到达之前不再继续订货。用 MC 法探讨这一决策 30 天内给该商场带来的盈利、可能的损失，并讨论如何改进决策使盈利更大。

5. 某商店经销台灯，每天平均 100 台，标准差 30 台。商店向工厂订货，每次订货到达天数情况为最快 2 天，最迟 12 天，平均 4.5 天。盈利的情况是，每出售一台获利 10 元，商店内每库存一台每天损失 0.1 元。现在该商店一个月 30 天内经营决策初步拟定为：月初存 350 台，每当库存≤350 台时向工厂订货，每次订货量均为 350 台，但在上批订货未到之前不再继续订货。用模拟方法探讨这一决策在 30 天内所带来的盈利情况，从而为改进决策、提高盈利提供决策依据。



第7章 系统动力学仿真

本章关键词

系统仿真(system simulation)　系统动力学(system dynamics)

本章要点

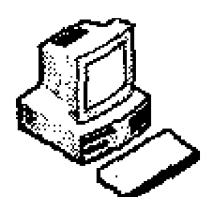
系统动力学是认识某类复杂问题的一种方法学。它的发展可以追溯到20世纪50年代兴起的工业动力学,当时主要用于解决企业中出现的一些有关经营管理的问题。本章介绍系统动力学的应用对象和表示方法,重点掌握系统动力学方法的建模步骤。

系统动力学是认识某类复杂问题的一种方法学。它的发展可以追溯到20世纪50年代兴起的工业动力学,当时主要用于解决企业中出现的一些有关经营管理的问题。例如,产量和雇佣的不稳定性、企业发展中的波动和萧条现象以及股票市场上出现的跌落现象。在短短的几年中,工业动力学的方法已得到了广泛的应用,如经营管理某个"研究与开发"规划,解决城市的萧条与衰退问题,认识有限的、正在减少的自然资源中出现的指数增长的含义等,甚至对糖尿病理论的检验也用到了工业动力学。

因此,"工业动力学"很快就改用了"系统动力学"这一更广义的名称。它在这里的含义是,代表着适用范围的广泛性、问题的复杂性以及观点的概括性,也就是一种用于解决某一特定问题的系统研究方法。需要强调的一点是,系统动力学着重研究的并不是一个系统,而是一个问题。

7.1 系统动力学的一般概述

系统动力学又称系统动态学(system dynamics,SD),由美国麻省理工学院福瑞斯特教授于1956年提出的一种分析研究信息反馈系统动态行为的计算机仿真方法,它将信息反馈的控制原理与因果关系的逻辑分析结合,依据系统的内部结构建立仿真模型,并对模型实施各种不同方案,寻求解决问题的正确途径。系统动力学专家认为,系统的行为模式和特性主要取决于其内部结构与反馈机制,因此按系统动力学理论和方法建立模型,并借



助于计算机模拟可以用于定性与定量地研究系统问题。通常情况下，研究社会经济系统时的各种理论设想，一般都不宜直接在实际系统上做试验。而系统动力学则可以作为实际系统（特别是社会、经济、生态等复杂大系统）的“试验室”，来进行长期的、动态的、战略性的定量分析与研究。

系统动力学研究问题从系统内部微观结构入手，建立 SD 数学模型，运用计算机技术，并按时间步长（足够小）法上机模拟运行。根据前一时刻系统状态，估算出下一时刻系统状态，一步步展现系统动态演变过程。系统动力学模拟时间可长可短，以长为好，尤其适用中长期预测预报，这一特性对具有大惯性的社会经济系统的模拟尤为珍贵。

系统动力学所探讨的问题，至少有两个共同的特征。第一，它们都是动态的，就是说包含的量具有随时间而变化的特性。如工业上雇佣人员的波动、城市中税收和生活水准的降低以及医疗费明显的上涨。此外，建筑工程经费的超支、政府的发展过程、癌症甚至心理上的抑郁症，这些都是动态问题，而且都可以用变量随时间变化的图形来表示。总之，学习系统动力学首先要建立一个动态的概念。第二，都具有反馈的特征，使用反馈来揭示原因和寻找解决办法。系统动力学应用于解决反馈系统中的动态问题。事实上，团体、机构、经济、社会等所有的人类系统都是反馈系统。

系统动力学以反馈控制理论为理论基础，以计算机技术为手段，擅长研究复杂社会经济大系统。在实际应用中，有人把系统动力学方法比做远望未来的“望远镜”，也有人把系统动力学方法比作“社会科学试验室”或“战略与策略试验室”。例如：我国由宋键领导的中国人口未来十年的系统动力学模型受到联合国好评。

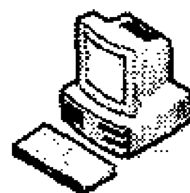
7.2 系统动力学的应用对象

下面介绍系统动力学的应用对象。

(1) 系统动力学主要研究复杂问题的反馈过程。系统动力学家们认为，反馈结构是导致事物随时间变化的根源。作为反馈观点的原因和结果的系统动力学研究方法，具有在系统内部寻找问题行为根源的特性。系统外的作用力并非导致问题的根源。

库存不会因为消费者周期性地改变订单而波动；球不会仅仅因为被扔下而反弹；单摆不会因为被置于垂直位置而不摆动。从系统动力学的观点来看，这些系统行为的根源在系统内部。球的反弹、单摆的摆动是因为其内部结构中的某一因素才使它们具有反弹或摆动的趋向。

实际上，内部观点就是把外部的作用力包括在系统内部的反馈系统模型之中。因此，消费者的订单就成了生产系统的内生因素，成了系统反馈结构的一部分。订单影响产量，产量影响订单。反馈概念的重点部分就在于内生观点有助于说明系统的动力学研



究法。

(2) 对于复杂的大系统来说，利用系统动力学的观点和思想进行研究往往非常有效。

系统动力学适用研究的系统，一般具备如下特点。

① 系统是一个复杂的社会系统。

② 系统是一个大跨度系统。

③ 系统是一个多目标函数系统。

④ 系统是一个动态系统。

⑤ 系统是一个可分系统。

⑥ 系统是非线性系统。

⑦ 系统中具有多重反馈和长时滞性。

⑧ 系统所涉及的问题不是完全独立的，而是相互联系的，甚至是相互融合的。

因此，系统动力学往往根据社会系统的因果关系构造出反映非线性、多重反馈和长时滞性的动态模型，并利用计算机仿真的方法实现动态系统的变化过程，进而分析社会因素即决策因素对系统变化的影响。特别是在系统结构复杂、历史数据少的情况下，可以了解系统内部结构和动态行为特征，深化对系统本质的认识，并可以利用它作为政策模拟分析思路的理论依据，具有其他方法难以替代的作用。

(3) 系统动力学模型的支持系统是构造，而不是数据。基于因果关系和结构决定行为，是系统动力学建模的特有之处，也是其他方法(如计量经济学、运筹学等)在分析社会经济系统时所无法比拟的。采用系统动力学的定性分析和定量分析相结合的原理与方法，建立系统模型，并以计算机为工具，进行仿真试验和计算。所获信息被用来分析和研究系统的结构和行为，为正确决策提供科学的依据。

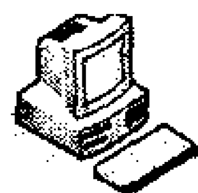
系统动力学方法从系统总体出发，充分估计和研究影响因素，注重研究系统内部的非线性相互作用以及延迟效应等。同时，它是一种结构化、动态的、连续型的系统建模仿真方法，虽精度不够高，但能满足许多社会经济等管理问题的要求，也有一定的预测功能。

7.3 系统动力学的表示方法

7.3.1 系统动力学研究过程

从系统动力学的观点来研究问题，大致可分为以下 7 个阶段：问题的识别与定义、系统的概念化、模型格式化、模型行为的分析、模型评价、策略分析、模型的使用或执行。

根据系统动力学的研究阶段，也可以得出系统动力学研究问题的基本过程，分为 6 个阶段：问题定义、模型概念化、模型数学表达、仿真、评价及政策分析。其中问题定义和模型概念化是系统动力学研究中两个技术性较弱的阶段。在第二个阶段，要求阐明问题的



内容和特征，勾勒出系统参考模型，明确建模的目的，确定系统边界，按照行为和信息反馈环确定系统结构；而模型的数学表示、仿真和政策分析 3 个阶段，完成按照反馈结构用特定语言表达的模型，观察模型行为及依据相关统计数据评价行为的拟合度；政策分析则是通过效果检验得出其社会经济发展的适用程度。

在利用模型方法的研究中，不仅要准确地描述现实领域，也要合理地描述控制领域。

（1）现实领域包括经济水平、人口水平、消费水平、系统需求和供给等。

（2）控制领域一般包括国民收入分配政策、人口控制政策、经济发展政策等。

上述系统要素基本上能够界定系统的研究范围，而系统的行为变化则取决于上述系统要素的构成及其相互关系。经过上述系统要素分析，在深入剖析系统要素的基础上，可以得到系统的因果关系图。

7.3.2 系统动力学模型的表示方法

1. 因果关系

系统由相互依存、相互作用的因素组成。若一个因素的变化引起另一个因素的变化，则两者之间存在因果关系。在基本因果关系图中，包括若干个正反馈、负反馈基本反馈环，它们定性地描述系统内部结构和系统的整体性，是系统动力学建立模型的基础。

因果链：要素 A 与 B 之间存在因果关系，用箭线表示：$A \rightarrow B$。因果关系有正和负两种，它采用隔离方法假设其他条件不变，只表示两两变量间因果的关系。

正负极性因果链：有两个要素 A 和 B，如果 A 增大导致 B 也增大，或者 A 减小导致 B 也减小，则表示 A 与 B 具有正极性因果关系，记为 $A \xrightarrow{+} B$；如果 A 增大导致 B 减小，或者 A 减小导致 B 增大，则表示 A 与 B 具有负极性因果关系，记为 $A \xrightarrow{-} B$。例如，人口总数 POP 与出生人口数 BRTH 呈现正极性因果链关系：POP $\xrightarrow{+}$ BRTH，反之也呈现正极性因果链关系：BRTH $\xrightarrow{+}$ POP；而死亡人数 DTH 与人口总数 POP 呈现负极性因果链关系，即 DTH $\xrightarrow{-}$ POP。

反馈回路：在多数场合下，结果又构成新的原因，新的原因作用到另外的要素上或者以反馈的形式作用到原因上产生新的结果，从而要素之间因果关系构成有向图。串联若干依次作用的因果链形成一个闭合的因果序列进行信息传递和返回就构成反馈回路，它能够定性表达系统变化的原因，具有使系统或者其中某因素变量自我强化显示发展或者自我抑制趋于稳定的功能。若干相互

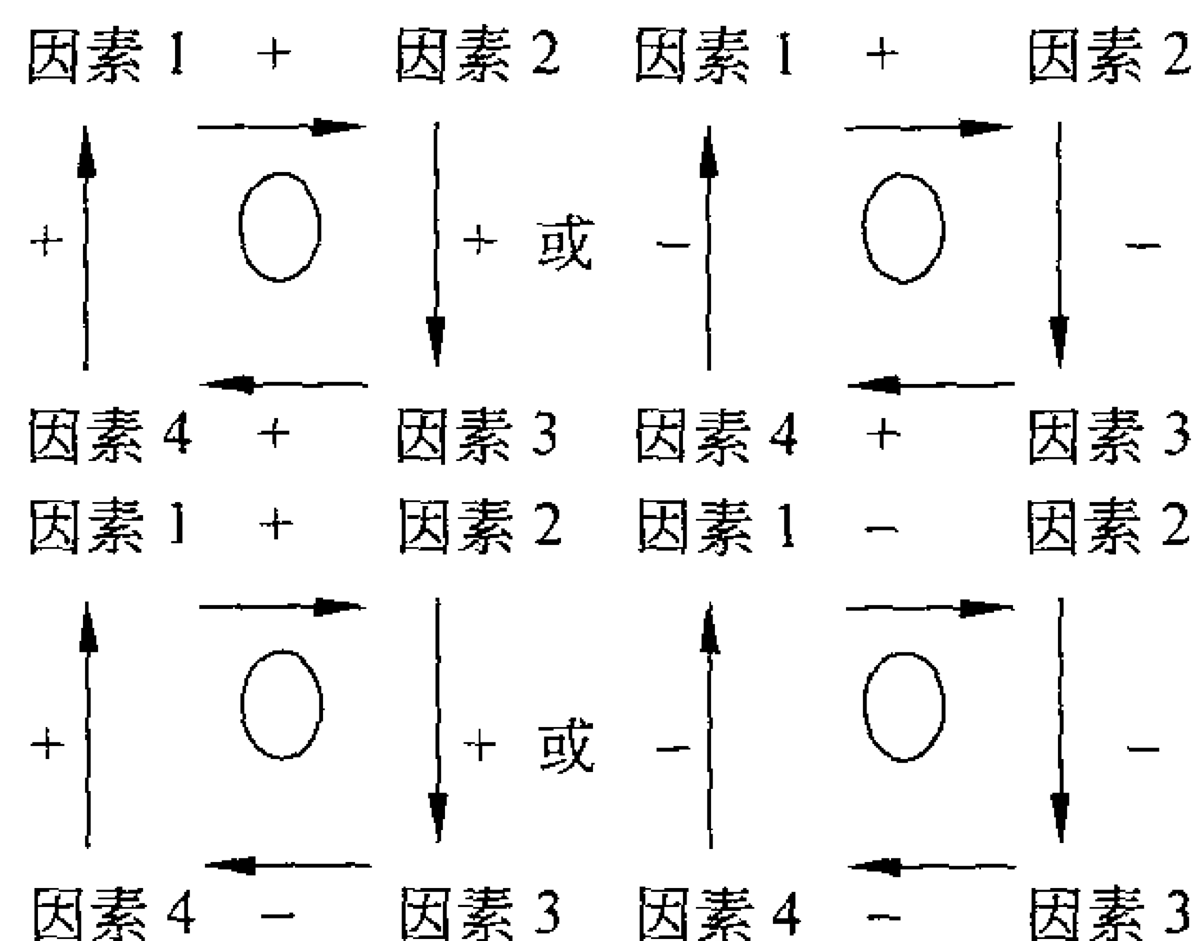
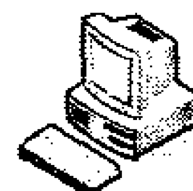


图 7-1 单回路示意图



联结的反馈回路集合构成反馈系统。单回路如图 7-1 所示。

过程的起点和终点都是对系统及其问题的理解。因此，它是一个环而不是线性地上升。图 7-1 中箭线表示了这些阶段可能通过的进程，其中箭头表示这一过程的循环和迭代的特性。

(1) 正反馈回路：回路上负极性因果链的个数为偶数个。

注意：*回路上负极性因果链的个数为 0 个（即全部为正极性因果链），仍然是正反馈回路。*

例如，POP $\xrightarrow{+}$ BRTH $\xrightarrow{+}$ POP 就是一个正反馈回路；利润、成本与原料利用率构成一个正反馈回路，见图 7-2。

再如，社会大系统——科技进步（T）通过社会生产过程（生产、分配、交换、消费）（P_1）的演变，不断促进社会生产经济活动（B）的增长；而社会经济活动的增长又会带来社会生产效益（P_2）的提高，不断推动社会发展（S）的进程；社会发展引起社会生产方式（生产力、生产关系）（P_3）的变化，社会的富足又提供了更多的人、财、物进入科技领域，不断激励科技（T）的进步，形成一个正反馈回路，见图 7-3。

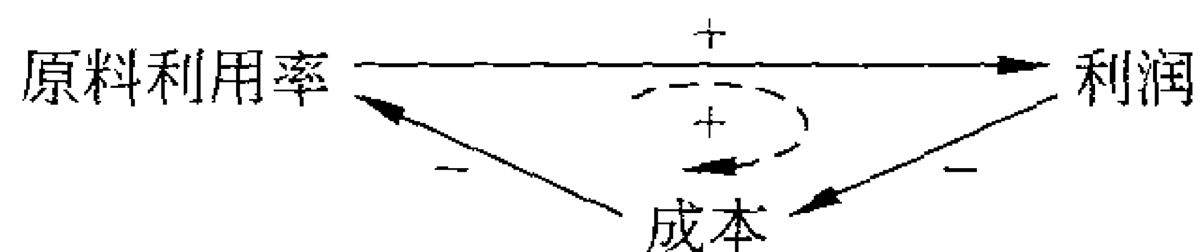


图 7-2　正反馈回路图

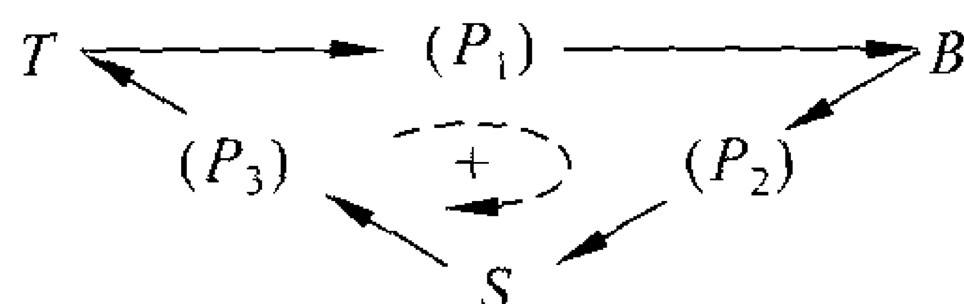


图 7-3　*TBS* 三角关系正反馈描述

(2) 负反馈回路：回路上负极性因果链的个数为奇数个。例如，POP $\xrightarrow{+}$ DTH $\xrightarrow{-}$ POP 就是一个负反馈回路；库存量、期望的库存量与进货量之间具有负反馈回路，见图 7-4。

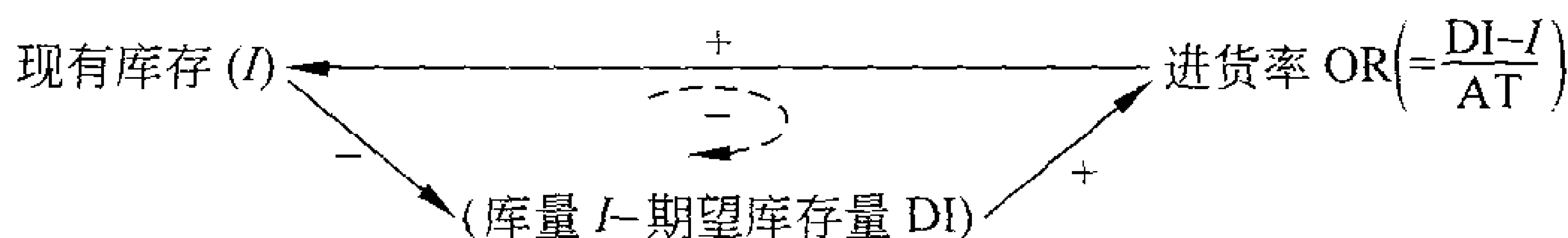
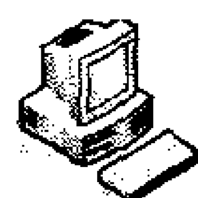


图 7-4　负反馈回路图

(3) 耦合回路：系统中至少含有两个回路通过系统的一个公共元素连接。

例如，DTH ⇄(−) POP ⇄(+) BRTH。再如粮食亩产系统。农业投资增加，对农业生产投入更多的水、电、肥、机械、农药等，促进粮食单产增加，进而提高农业收入，使农业有更多的资金可用于自身的积累，扩大再生产，构成不断自我强化的良性循环，这是一个正反馈子系统；另外，农业生产投入的农药等又会加重土壤的负荷，使得土壤肥力吸收下降，粮食产量就要受到影响，这是一个负反馈子系统。这两个子系统以粮食产量作为连接系统的公共元素，形成了一个耦合回路系统，见图 7-5；轻重工业投资也形成了一



个耦合回路，见图 7-6。

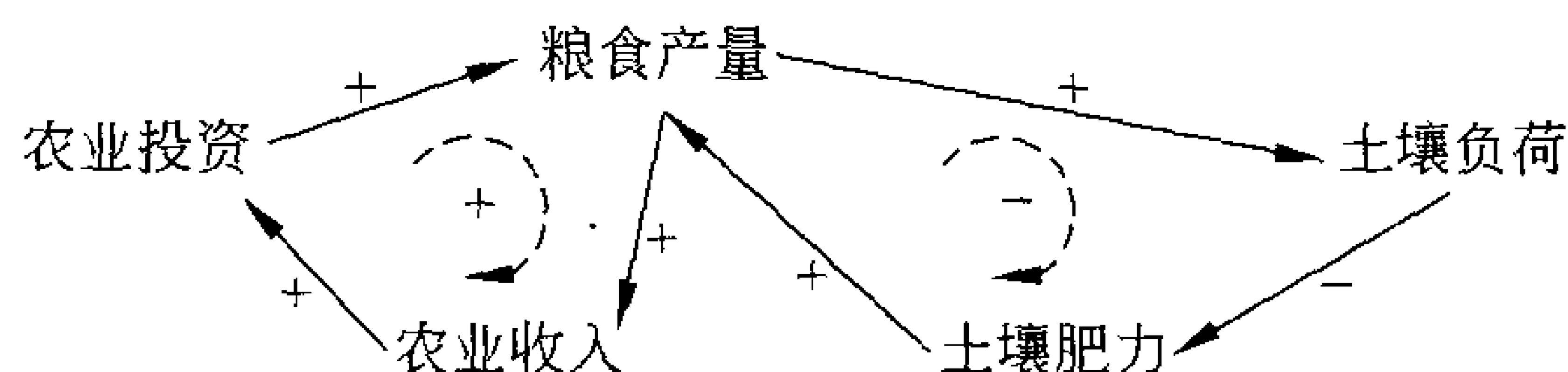


图 7-5　耦合回路图(1)

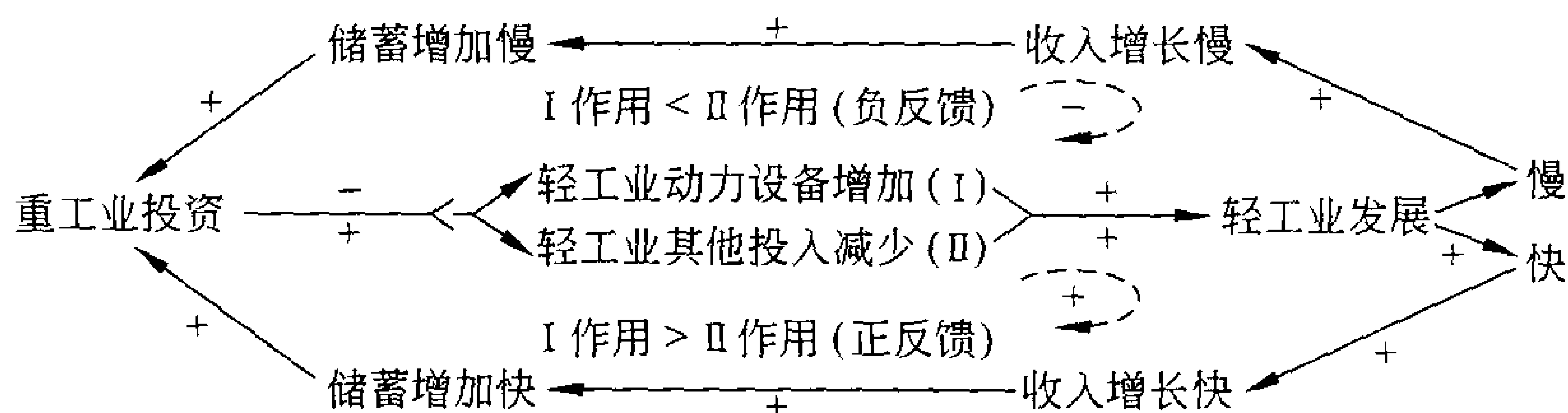


图 7-6　耦合回路图(2)

2. 因果关系图

下面通过例子来看如何建立因果关系图。

例 7-1　建立“牧场、种草与养羊的多种经营”的因果关系图。

分析　农场多种经营要素有三个，即“养羊”，包含羊总数、羊繁殖数和羊死亡数；“种草”，包含草总数、草繁植数和草消亡(包括吃掉)数。因果关系如图 7-7 所示。

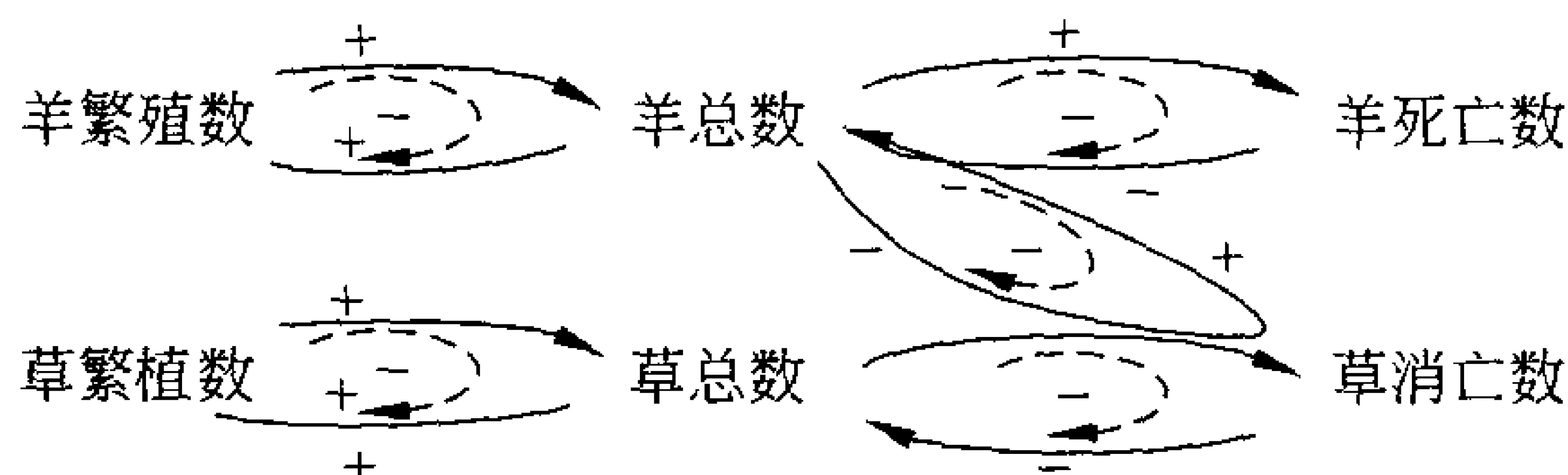


图 7-7　耦合回路图(3)

例 7-2　建立“仓库管理系统”的因果关系图。其中仓库管理系统要素为：现有库存量 I(积累量)、期望库存量 DI(定值)、调整时间 AT(定值)和订货率 $\mathrm{OR}=\dfrac{\mathrm{DI}-I}{\mathrm{AT}}$(调整量)。二阶库存管理系统因果关系图如图 7-8 所示。

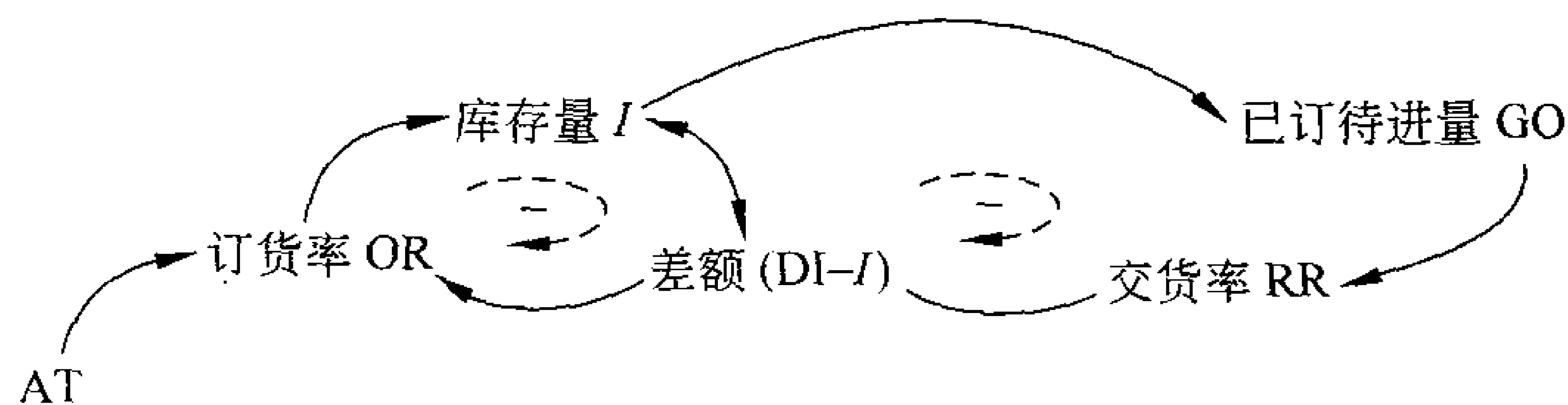
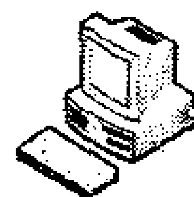


图 7-8　二阶库存管理系统的因果关系图



注意：因果关系图简洁明了地反映了要素之间的因果反馈回路关系，但是也存在不足。

(1) 不能反映物质链和信息链的差别。

(2) 不能反映物质的积累值和积累效应变化快慢的区别。

3. 流图

流图确定反馈回路中变量状态发生变化的机制，明确表示系统各元素间的数量关系，反映物质链与信息链的区别，能够反映物质的积累值及积累效应变化快慢的区别。

1) 物质链与信息链

物质链：表示系统中流动的实体，连接状态变量和决策变量，是不使状态值变化的守恒流。物质链用符号“→”表示，即要素 A→要素 B，其中要素 A 和 B 都是系统中流动的实体。例如，材料、产品、劳动力、人口、资产、住宅、国土、资源、能源、污染、订货、需求、货币等都是系统中流动的实体。

信息链：连接状态和变化率的信息通道，是与因果关系相连的信息传输线路。信息链用符号“O···→”表示，即 A O···→B，其中要素 A 是变化率，而 B 是系统状态。例如，出生率 BRTH O···→ 人口总数 POP；订货率 OR O···→ 库存量 I。

2) 状态变量与决策变量

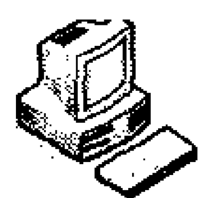
状态变量(又称流位)(x)：描述系统物质流动或信息流动积累效应的变量，表征系统的某种属性，有积累或积分过程的量。状态变量用▭符号来表示。例如，人口数量、库存量、固定资产、污染量等都是系统的状态变量。

决策变量(又称流率)(r)：描述系统物质流动或信息流动积累效应变化快慢的变量，其具有瞬时性的特征。用于反映单位时间内物质流动或信息流量的增加或减少的大小，如相对量、速度、微积分中的变化率等。决策变量用符号⧖表示。例如，人口出生率和死亡率、固定资产投资率和折旧率、库存系统的订货率等都是决策变量。

注意：决策变量需要的信息来源于状态变量，两个状态变量用一个决策变量联结，即状态变量与决策变量在系统反馈回路中必同时相间存在而各自不直接联结。

(1) 状态变量与决策变量的确定还应由研究问题的性质而定。例如，产品的月销售量(件/月)，研究销售量，则月销售量为决策变量；若研究平均月销售量，则月销售量就是状态变量。

(2) 可以设想，从某个时刻起让运动着的系统突然停下来，如果是变化率，它的作用会立即消失，即变化率为零。而状态变量因是过去所有变化活动的积累，故不会因系统停止活动而消失。



(3) 任何决策反馈回路一定要包含状态变量和决策变量这两种基本变量。

(4) 含有 n 个状态变量的系统称为 n 阶系统。

3) 常量

常量是指描述系统中不随时间而变化的量,用符号⊖表示。例如,期望的库存量、调整时间等都是常量。

4) 辅助变量

辅助变量(起桥梁式辅助作用)是指从信息源到决策变量之间,起到辅助表达信息反馈决策作用的变量。其类似决策变量,但无直接相关的状态变量,可以简化决策变量的表达。它在数量上具有时变性,在概念上无积累性、无速率性,在状态变量与变化率间或在环境与内部反馈回路间的信息通道上起辅助作用。辅助变量用符号⊖‐‐→表示。例如,库存量 I 为状态变量,订货率 OR 为决策变量,则 CC=期望库存量 DI−库存量 I 为辅助变量。

注意:(1) 辅助变量往往具有独特的经济或物理意义,可以简化决策变量的表达。例如,

$$订货率=\frac{期望库存量-库存量}{调整时间}=\frac{辅助变量}{调整时间}$$

(2) 辅助变量往往无量纲,如相对密度、繁殖系数。

(3) 辅助变量设计是一种技巧。

5) 源与汇

来自系统之外的流的起源称为源,用符号⬭表示。离开系统的流的归宿称为汇。

6) 其他

例如表函数,用符号⊖表示;外生变量,即不在反馈回路中的变量或只影响其他变量,或只受其他变量影响的量。外生变量用符号◎表示。

例 7-3 绘制一阶库存系统的流图。

第一步,绘制一阶库存管理系统的因果关系图,见图 7-9。

第二步,绘制一阶库存管理系统的流图(见图 7-10)。

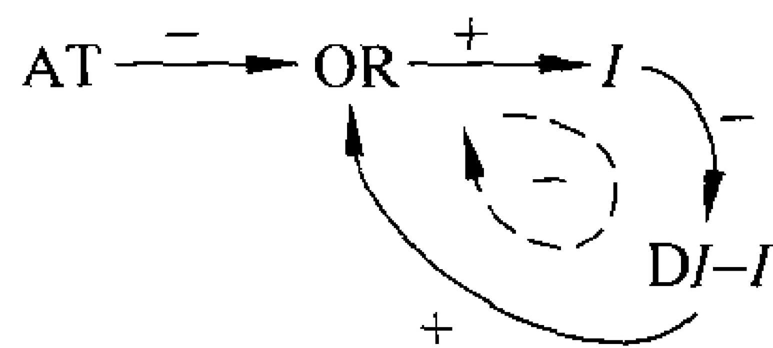
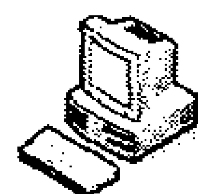


图 7-9 一阶库存管理系统的因果关系图

例 7-4 绘制二阶库存系统的流图。DI 为期望库存量;I 为现有库存量;AT 为调整期(每单位时间的订货量是期望库存与实际库存差额的 1/AT);OR 为订货率;GO 为已订待进量(途中量)(注:其初值也为 GO);DO 为进货延迟时间;RR 为交货率(进货率)。试分析库存量 I 的变化情况。

第一步,绘制二阶库存管理系统的因果关系图,见图 7-8。



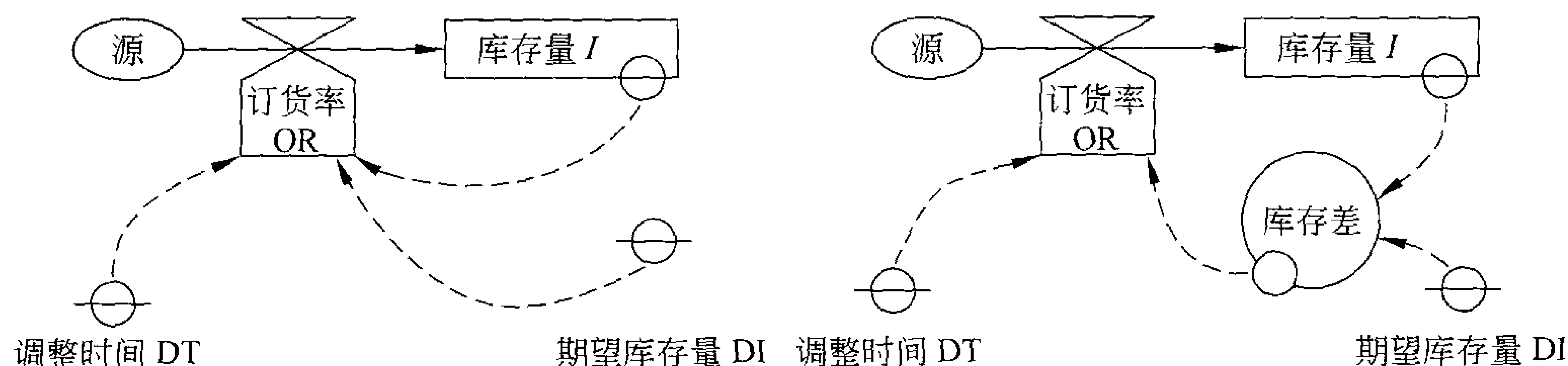


图 7-10　一阶库存管理系统的流图

第二步，给出流图。设状态变量 $X(t)=\{I,GO\}$；决策变量 $R(t)=\{OR,RR\}$；常量＝$\{AT,DI,DO\}$。

由因果关系图转为流图，见图 7-11。

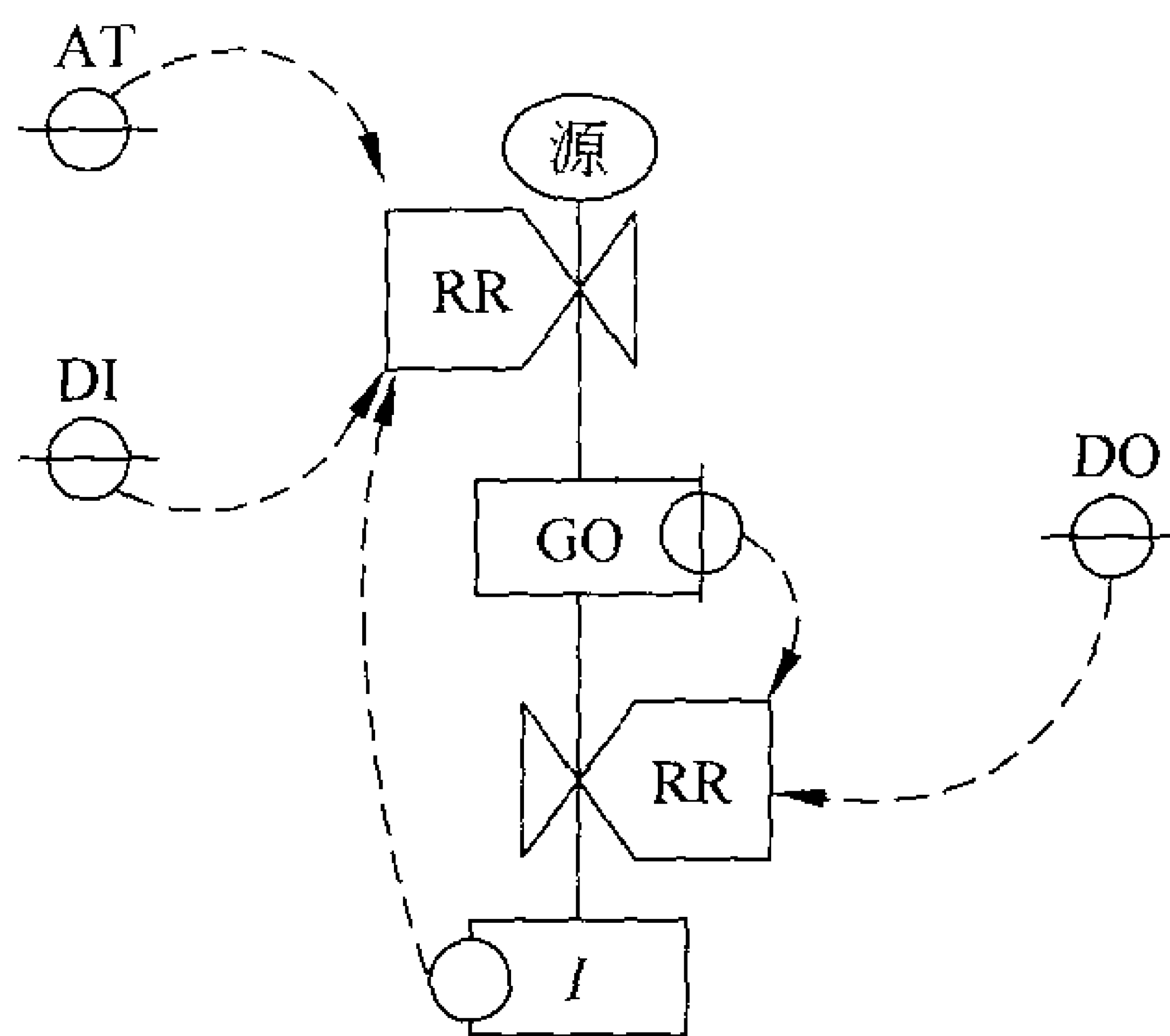


图 7-11　二阶库存管理系统因果关系流图

4. 方程式

系统动力学利用方程代表计算机语言描述系统的动态行为，是对流图中量的关系的补充说明，为求解模型或编程模拟、仿真分析做准备。系统动力学方程有状态变量方程和决策变量方程两种，下面分别介绍。

1) 状态变量方程

设 $\boldsymbol{R}=(r_1,r_2,\cdots,r_n)$ 代表决策向量，$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 代表状态向量。考察一阶系统 $\boldsymbol{R}=R(t)$，$\boldsymbol{X}=X(t)$，则：

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t}=R(t)\quad 或\quad \frac{\Delta X(t)}{\Delta t}=R(t)$$

对于离散系统，由欧拉法可得差分方程：

$$X(t+\Delta t)=X(t)+\Delta t\cdot R(t)$$

其中 Δt 足够小。

记 Δt＝DT(时间间隔)，则：

决策变量(变化率)＝ 流入率－流出率＝ 增加率－减少率

即
$$R(t)=R_{\text{int}}-R_{\text{out}}=R_1-R_2 \tag{7-1}$$

当前时刻状态变量＝前一时刻状态变量＋时间间隔×(前一时刻增加率－前一时刻减少率)

则：

$$X(T+\mathrm{DT}) = X(T) + \mathrm{DT}\cdot(R_1(T) - R_2(T)) \tag{7-2}$$

即

状态变量(当前时刻)=状态变量(前一时刻)+DT·(R_1(前一时刻)−R_2(前一时刻))

则式(7-2)又可表示为

$$X_{T+\mathrm{DT}} = X_T + \mathrm{DT}\cdot(R_{1T} - R_{2T}) \tag{7-3}$$

例如,一阶库存系统的状态变量方程为

库存量(当前时刻)=库存量(前一时刻)+DT×(订货率(前一时刻)−0)

或:

$$I_{T+\mathrm{DT}} = I_T + \mathrm{DT}\cdot\mathrm{OR}_T \tag{7-4}$$

二阶库存系统的状态变量方程为

库存量(当前时刻)=库存量(前一时刻)+DT·(进货率(前一时刻)−0)

或:

$$I_{T+\mathrm{DT}} = I_T + \mathrm{DT}\cdot\mathrm{RR}_T \tag{7-5}$$

已订待进量(当前时刻)=已订待进量(前一时刻)+DT×(订货率(前一时刻)−进货率(前一时刻))

或:

$$\mathrm{GO}_{T+\mathrm{DT}} = \mathrm{GO}_T + \mathrm{DT}\cdot(\mathrm{OR}_T - \mathrm{RR}_T) \tag{7-6}$$

2) 决策变量方程

当前阶段决策变量=f(状态变量,常量)

每一决策变量必配一决策变量方程,其中的函数关系根据学科原理、数量关系等确定。

例如,一阶库存系统的决策变量方程为

$$\text{订货率} = \frac{\text{期望的库存量} - \text{库存量}}{\text{调整时间}} \quad \text{即} \quad \mathrm{OR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{DI} - I_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{AT}} \tag{7-7}$$

二阶库存系统的决策变量方程为

$$\text{订货率} = \frac{\text{期望的库存量} - \text{库存量}}{\text{调整时间}} \quad \text{即} \quad \mathrm{OR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{DI} - I_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{AT}} \tag{7-8}$$

$$\text{进货率} = \frac{\text{已订待进量}}{\text{延迟时间}} \quad \text{即} \quad \mathrm{RR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{GO}_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{DO}} \tag{7-9}$$

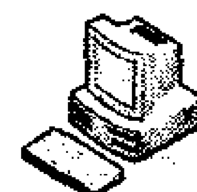
7.4 系统动力学的建模步骤

系统动力学建模的一般步骤为:

第一步,画出因果关系图。

第二步,画出相应的流图。

第三步,列出状态变量方程与决策变量方程。



第四步，设计表格并计算。

第五步，画出趋势图。

第六步，分析归纳。

目前可以借助相关的软件快速地进行计算机模拟。

例 7-5　建立一阶库存管理系统的系统动力学模型，分析系统的动态趋势。

第一步，建立一阶库存管理系统的因果关系图，见图 7-9。

第二步，建立一阶库存管理系统的流图，见图 7-10。

第三步，建立一阶库存管理系统的状态变量方程与决策变量方程，见式(7-4)和式(7-7)：

$$R \quad I_{T+\mathrm{DT}} = I_T + \mathrm{DT} \times \mathrm{OR}_T$$

$$L \quad \mathrm{OR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{DI} - I_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{AT}}$$

第四步，设：期初库存量 $I_0=1\ 000$ 件，期望库存量 $\mathrm{DI}=6\ 000$ 件，调整时间 $\mathrm{AT}=5$ 周。取时间间隔 $\mathrm{DT}=2$ 周。则计算：

初始期　$I_0=1\ 000$(件)

$$\mathrm{OR}_0=\frac{1}{5}\times(6\ 000-1\ 000)=1\ 000(件/周)$$

第二周　$I_2=I_0+\mathrm{DT}\times\mathrm{OR}_0=1\ 000+2\times1\ 000=3\ 000$(件)

$$\mathrm{OR}_2=\frac{1}{5}\times(6\ 000-3\ 000)=600(件/周)$$

第四周　$I_4=3\ 000+2\times600=4\ 200$(件)

$$\mathrm{OR}_4=\frac{1}{5}\times(6\ 000-4\ 200)=360(件/周)$$

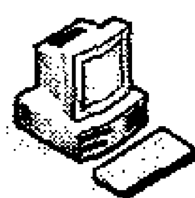
第六周　$I_6=4\ 200+2\times360=4\ 920$(件)

$$\mathrm{OR}_6=\frac{1}{5}\times(6\ 000-4\ 920)=1\ 080(件/周)$$

……反复运算结果见表 7-1。

表 7-1　一阶库存管理系统的库存量动态变化表

DT(周)	库存的变化量 $I_{t+1}-I_t=\mathrm{DT}\cdot\mathrm{OR}_t$(件)	库存量 I(件)	库存偏差 $\mathrm{DI}-I$(件)	订货率 OR(件/周)
0	0	1 000	6 000－1 000＝5 000	5 000/5＝1 000
2	2×1 000＝2 000	1 000＋2 000＝3 000	6 000－3 000＝3 000	3 000/5＝600
4	2×600＝1 200	3 000＋1 200＝4 200	6 000－4 200＝1 800	1 800/5＝360



续表

DT(周)	库存的变化量 $I_{t+1}-I_t=\mathrm{DT}\cdot\mathrm{OR}_t$(件)	库存量 I(件)	库存偏差 DI−I(件)	订货率 OR(件/周)
6	2×360=720	4 200+720=4 920	6 000−4 920=1 080	1 080/5=216
8	432	5 352	648	129.6
10	259	5 611	389	78
12	156	5 767	233	47
14	93	5 860	140	28
16	56	5 916	84	17
18	34	5 950	50	10
20	20	5 970	30	6
22	12	5 982	18	3.6
24	7.2	5 989.2	10.8	2.1

第五步，由表 7-1 中数据画出一阶库存管理系统的动态变化趋势图(图 7-12)。

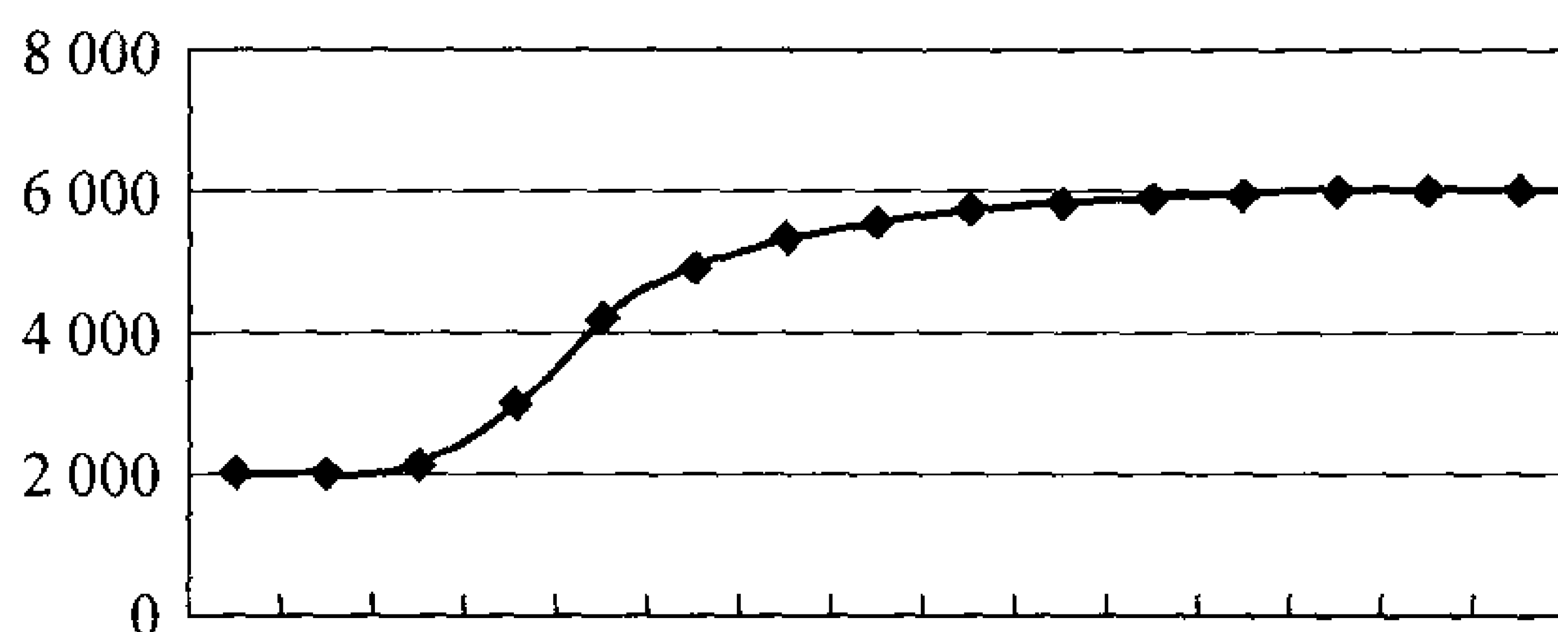


图 7-12　一阶库存管理系统动态变化趋势图

第六步，由图 7-12 可见，库存量以指数增长态势趋向期望的库存量，所需时间大约 24 周。

注意：期望的库存量如果用空调的设定温度来理解，则现有库存量可以理解为室内现有温度，DT=24 可以理解为经过 24 个单位时间，现有温度被调整到设定的温度。

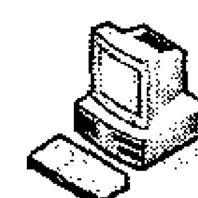
例 7-6　建立二阶库存管理系统的系统动力学模型，并分析系统的动态趋势。

第一步，建立二阶库存管理系统的因果关系图，见图 7-8。

第二步，建立二阶库存管理系统的流图，见图 7-11。

第三步，建立二阶库存管理系统的状态变量方程与决策变量方程，见式(7-5)、式(7-6)和式(7-8)、式(7-9)：

$$L\quad \mathrm{GO}_{T+\mathrm{DT}}=\mathrm{GO}_T+\mathrm{DT}\cdot(\mathrm{OR}_T-\mathrm{RR}_T)$$



$$L \quad I_{T+\mathrm{DT}} = I_T + \mathrm{DT} \cdot \mathrm{RR}_T$$

$$R \quad \mathrm{OR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{DI} - I_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{AT}}$$

$$R \quad \mathrm{RR}_{T+\mathrm{DT}} = \frac{\mathrm{GO}_{T+\mathrm{DT}}}{\mathrm{DO}}$$

第四步，设计表格如下：假定期初库存量 1 000 件，期望库存量 DI＝6 000 件，调整时间 AT＝5 周，已订待进量初值 GO(前一时刻)＝10 000 件，进货延迟时间 DO＝10 周，时间间隔 DT＝2 周。则表格计算：

初始期　$\mathrm{OR}_0 = \frac{1}{5} \times (6\,000 - 1\,000) = 1\,000$(件/周)

$\mathrm{RR}_0 = 10\,000/10 = 1\,000$(件/周)

第二周　$\mathrm{GO}_2 = 10\,000 + 2 \times (1\,000 - 1\,000) = 10\,000$

$I_2 = 1\,000 + 2 \times 1\,000 = 3\,000$

$\mathrm{OR}_2 = \frac{1}{5} \times (6\,000 - 3\,000) = 600$(件/周)

$\mathrm{RR}_2 = 10\,000/10 = 1\,000$(件/周)

第四周　$\mathrm{GO}_4 = 10\,000 + 2 \times (600 - 1\,000) = 9\,200$

$I_4 = 3\,000 + 2 \times 1\,000 = 5\,000$(件)

$\mathrm{OR}_4 = \frac{1}{5} \times (6\,000 - 5\,000) = 200$(件/周)

$\mathrm{RR}_4 = 9\,200/10 = 920$(件/周)

第六周　$\mathrm{GO}_6 = 9\,200 + 2 \times (200 - 920) = 7\,760$(件)

$I_6 = 5\,000 + 2 \times 920 = 6\,840$(件)

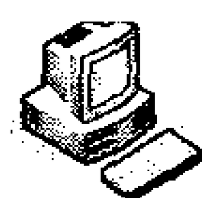
$\mathrm{OR}_6 = \frac{1}{5} \times (6\,000 - 6\,840) = -168$(件/周)

$\mathrm{RR}_6 = 7\,760/10 = 776$(件/周)

……反复运算结果见表 7-2。

表 7-2　二阶库存管理系统的库存量与订货量的动态变化表

DT(周)	库存量变化值(件)	库存量 I(件)	订货量变化值(件)	订货量 GO(件)	库存量偏差 DI－I(件)	订货率 OR(件/周)	进货率 RR(件/周)
0	0	1 000	0	10 000	5 000	1 000	1 000
2	2×1 000	3 000	0	10 000	3 000	3 000/5＝600	1 000
4	2×1 000	5 000	－800	9 200	1 000	200	920



续表

DT（周）	库存量变化值（件）	库存量 I（件）	订货量变化值（件）	订货量 GO（件）	库存量偏差 DI－I（件）	订货率 OR（件/周）	进货率 RR（件/周）
6	2×920＝1 840	6 840	－1 440	7 760	－840	－168	776
8	2×776＝1 552	8 392	－1 888	5 872	－2 392	－478	587.2
10	1 174	9 566	－2 131	3 741	－3 566	－713	374.5
12	748	10 315	－2 175	1 566	－4 315	－863	157
14	313	10 628	－2 039	－473	－4 628	－926	－47
16	－95	10 533	－1 757	－2 229	－4 533	－907	－223
18	－446	10 087	－1 367	－3 597	－4 087	－817	－360
20	－719	9 368	－916	－4 521	－3 368	－674	－451
22	－902	8 465	－445	－4 957	－2 465	－493	－496
24	－991	7 474	5	－4 952	－1 474	－295	－495
…	…	…					
62		7 000					

第五步，由表 7-2 中数据画出二阶库存管理系统的库存量动态变化趋势图（图 7-13）。

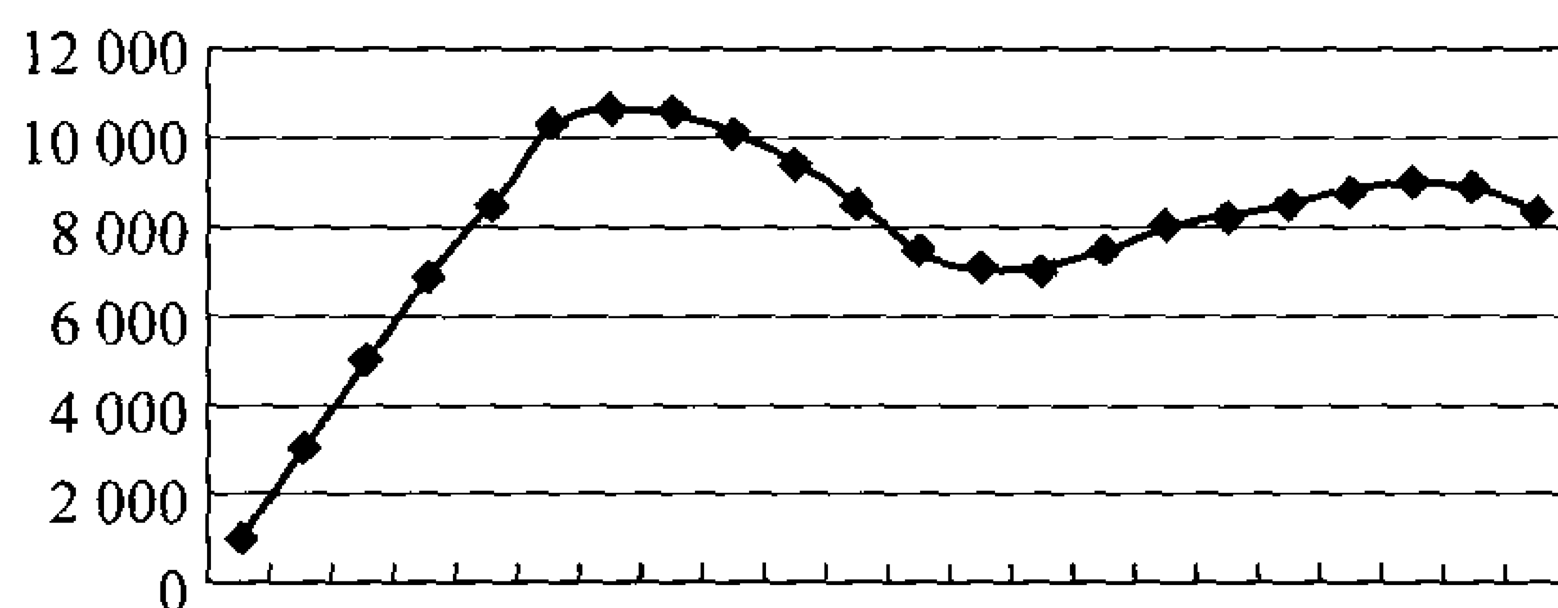


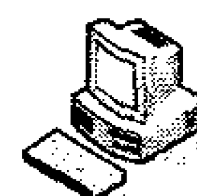
图 7-13　二阶库存管理系统库存量动态变化趋势图

第六步，由图 7-13 可见，库存量 I 以波动偏差形态趋近期望的库存量。

7.5　系统动力学应用案例①

对于不同的高等院校来讲，虽然在教学、科研、产业及其管理模式等方面会存在很大的不同，但高等院校现金流系统中都具有一些共性的结构——子系统。高等院校现金流

① 刘贻玲．基于系统动力学的高校现金流模拟模型分析[D]．江西理工大学，2007．



管理系统主要包括学生子系统、教师人力资源子系统、教学事业收支子系统、科研事业收支子系统、后勤产业收支子系统、基建子系统、筹资子系统、现金流量子系统等。高校现金流系统因果关系错综复杂(图 7-14),各影响因素又相互制约、相互依赖。

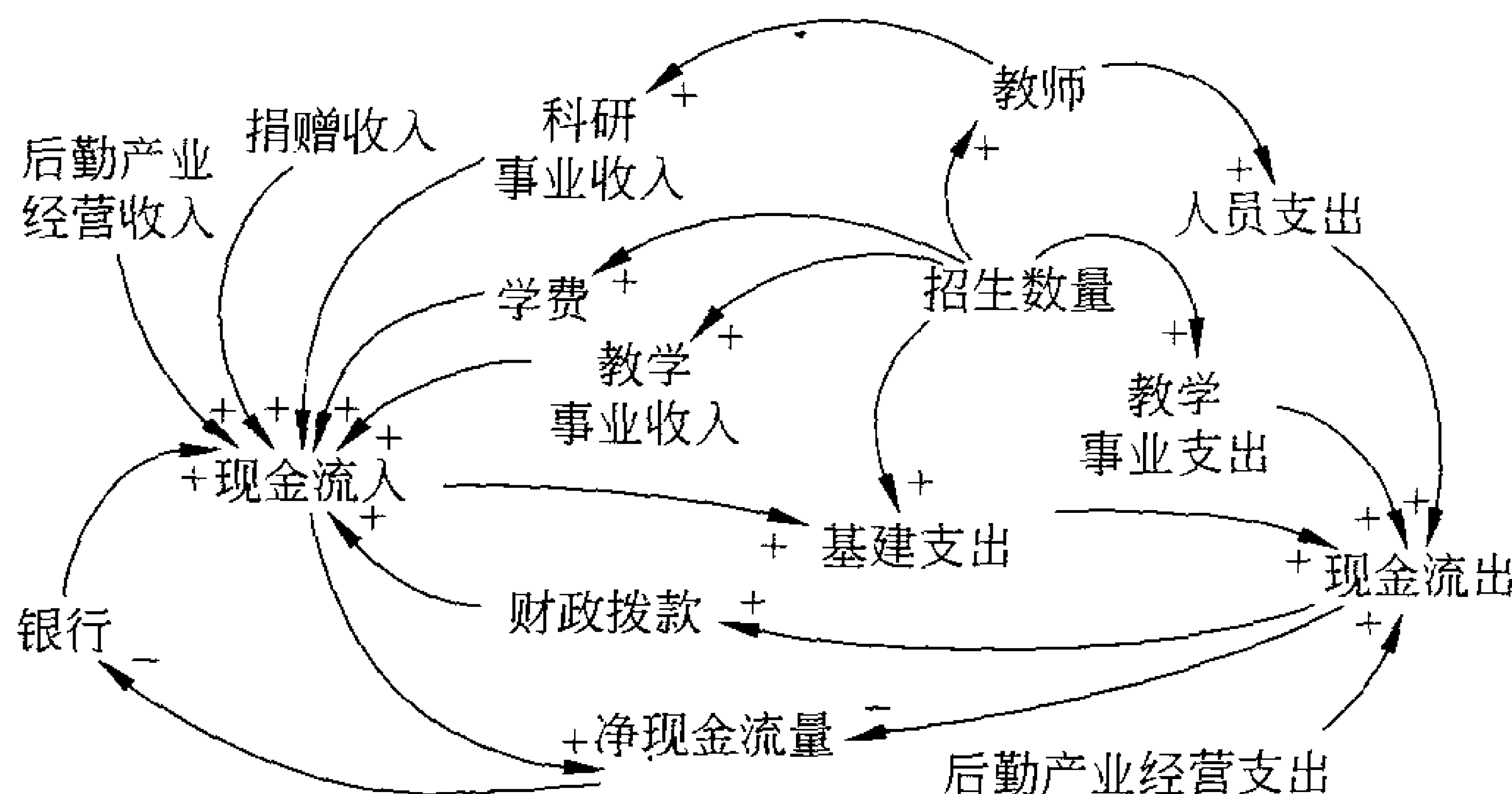


图 7-14　高校现金流系统因果关系循环图

因高校现金流系统涉及变量多,关系复杂,本书以教师人力资源子系统为例,说明系统动力学对于实际问题的建模及求解分析步骤。

教师人力资源子系统主要反映在校全体员工数量的变化情况,尤其是专职教师的变化情况(图 7-15)。决定教职员工数量变化的主要因素有人才引进强度、在校学生数、教师的激励水平、学校无形资产、学校办学资金。

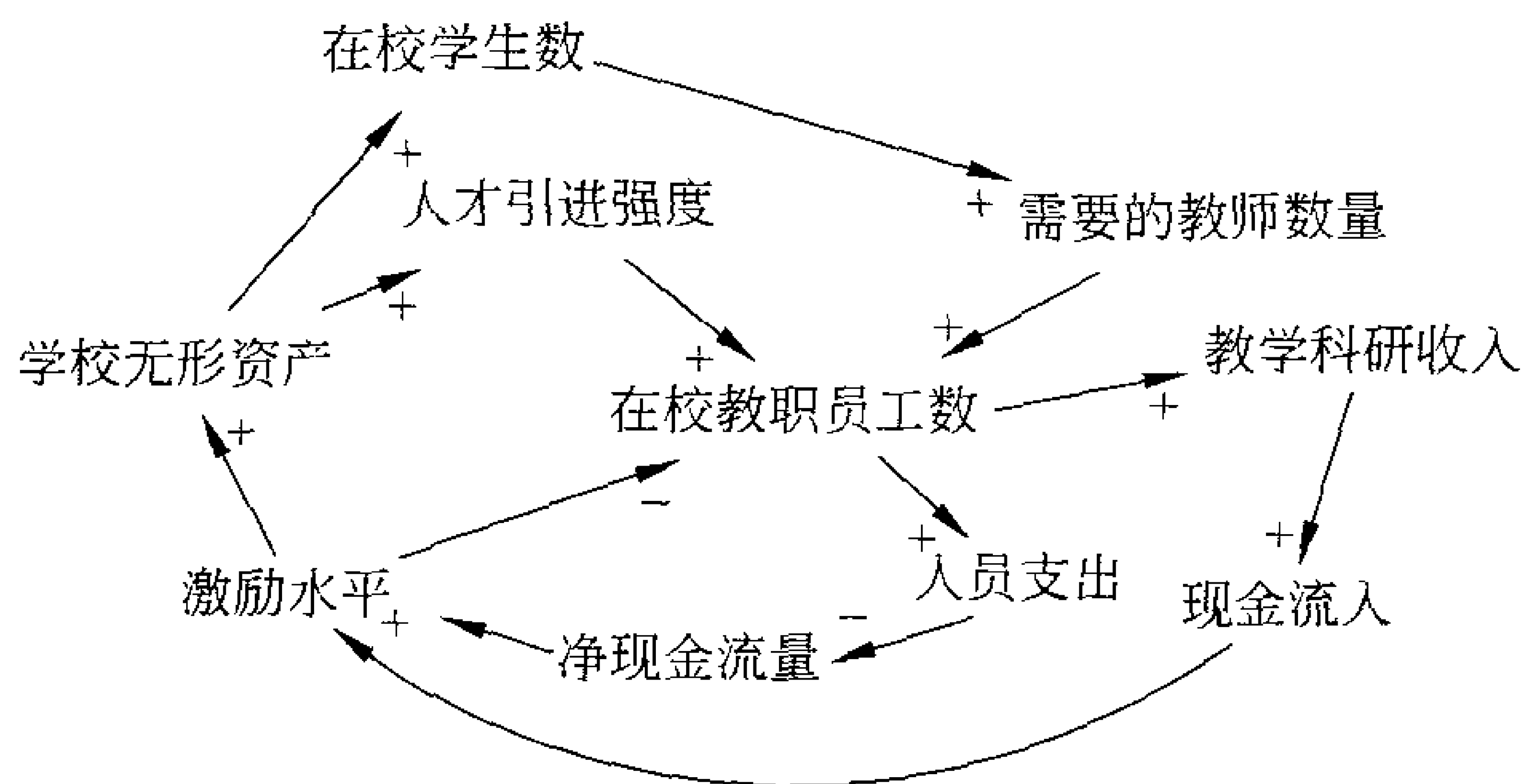
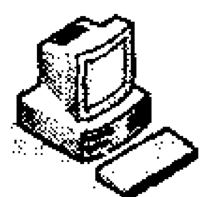


图 7-15　教师人力资源子系统

主要有三条反馈回路。

正反馈回路 1:在校教职员工数→+教学科研收入→+现金流入→+激励水平→+学校无形资产→+在校学生数→+需要的教师数量→+在校教职员工数

正反馈回路 2:在校教职员工数→+教学科研收入→+现金流入→+激励水平→+学校无形资产→+人才引进强度→+在校教职员工数



负反馈回路 1：在校教职工数→＋人员支出→－净现金流量→－激励水平→－在校教职员工数

教师人力资源子系统的因果关系图表达了教师人力资源子系统内部各要素发生变化的原因即反馈结构，但这种定性描述还不能确定使因果关系图的变量发生变化的机制。为了反映系统各因果关系中所没能反映出来的不同变量的特性和特点，进一步明确表示系统各变量之间的数量关系，使系统内部的作用机制更加清晰明了，需将因果关系图转化为系统流图，并建立相应的模型方程式。

为了简化模型，按教师职称的变化，如把专职教师分为助教、讲师、副教授及教授而没有按年龄、性别来反映其之间的变化；另外，引进各类专职教师是学校根据人才引进强度以及生师比得到的，其他教学教辅、科研以及党政类教职员工根据表函数来表示(图 7-16)。

以上模型的基本方程式为：

(1) 生师比＝INTEGER(折合在校生数/专任教师总数)

(2) 新招助教老师人数＝INTEGER(MAX(人才引进强度×生师比,0))

(3) 进入讲师人数＝INTEGER(助教人数×助教进入讲师的比率)

(4) 助教减员人数＝INTEGER(助教人数×助教减员率)

(5) 助教人数＝INTEG(INTEGER(＋新招助教老师人数－进入讲师人数－助教减员人数),助教人数初值)

(6) 在校专任教师数＝助教人数＋讲师人数＋教授人数＋副教授人数

(7) 聘请校外教师人数＝INTEGER(MAX(在校专任教师数×校外教师占在校专任教师比率,0))

(8) 专任教师总数＝INTEGER(在校专任教师数＋聘请校外教师人数×聘请校外教师折合比例)

(9) 新招管理人员＝新招管理人员计划(Time)

(10) 管理离退人员＝INTEGER(管理人员×管理人员离退减少率)

(11) 管理人员＝INTEG(＋新招管理人员－管理离退人员,管理人员初值)

(12) 教师人员减员人数＝助教减员人数＋讲师减员人数＋副教授减员人数＋教授减员人数

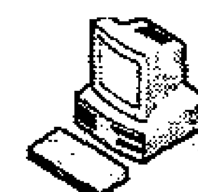
(13) 专任教师离退休人员＝INTEGER(教师人员减员人数×离退休人员比率)

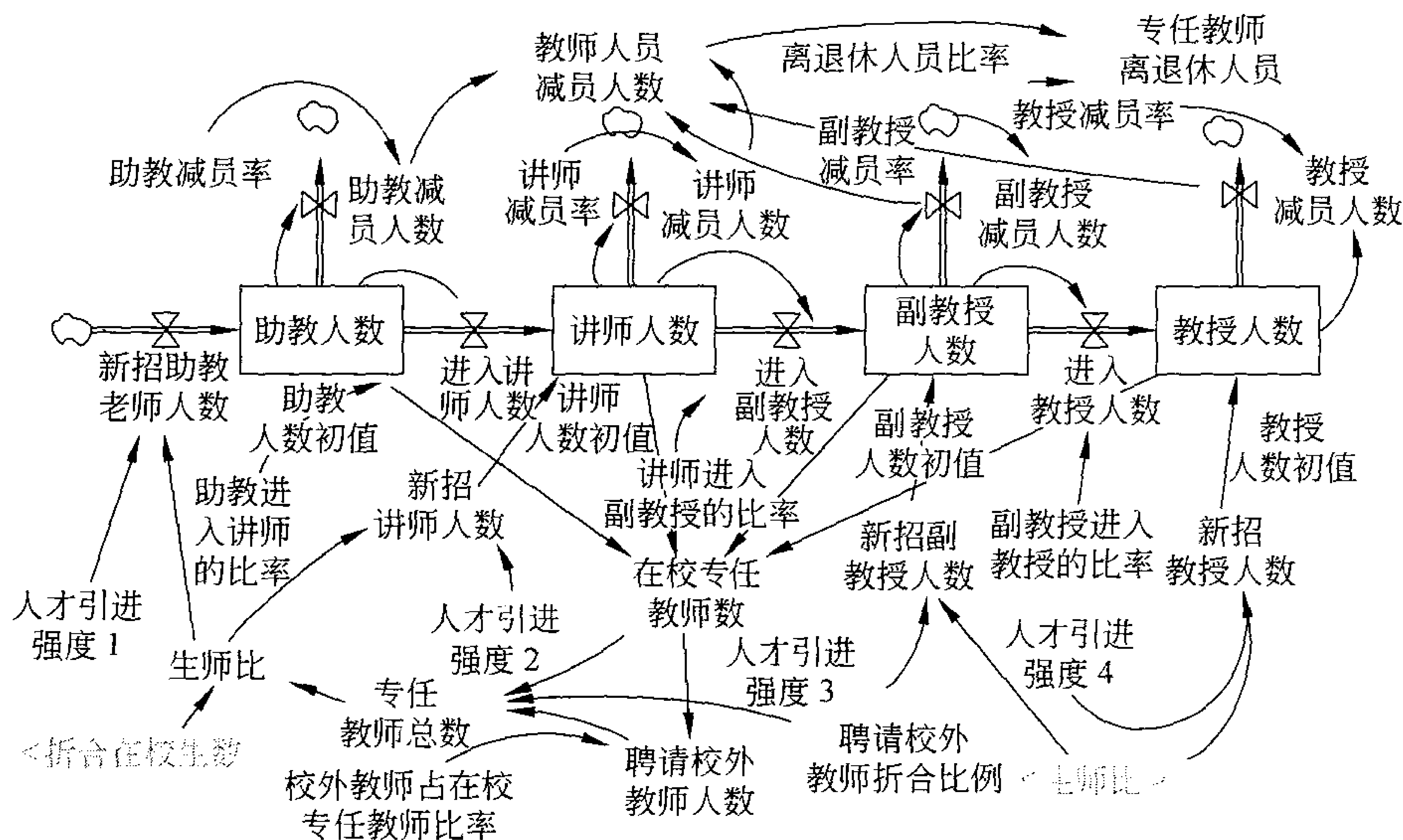
(14) 其他退休人员＝管理离退人员＋教学教辅离退人员＋科研离退人员

(15) 去世＝离退休总数×去世比率

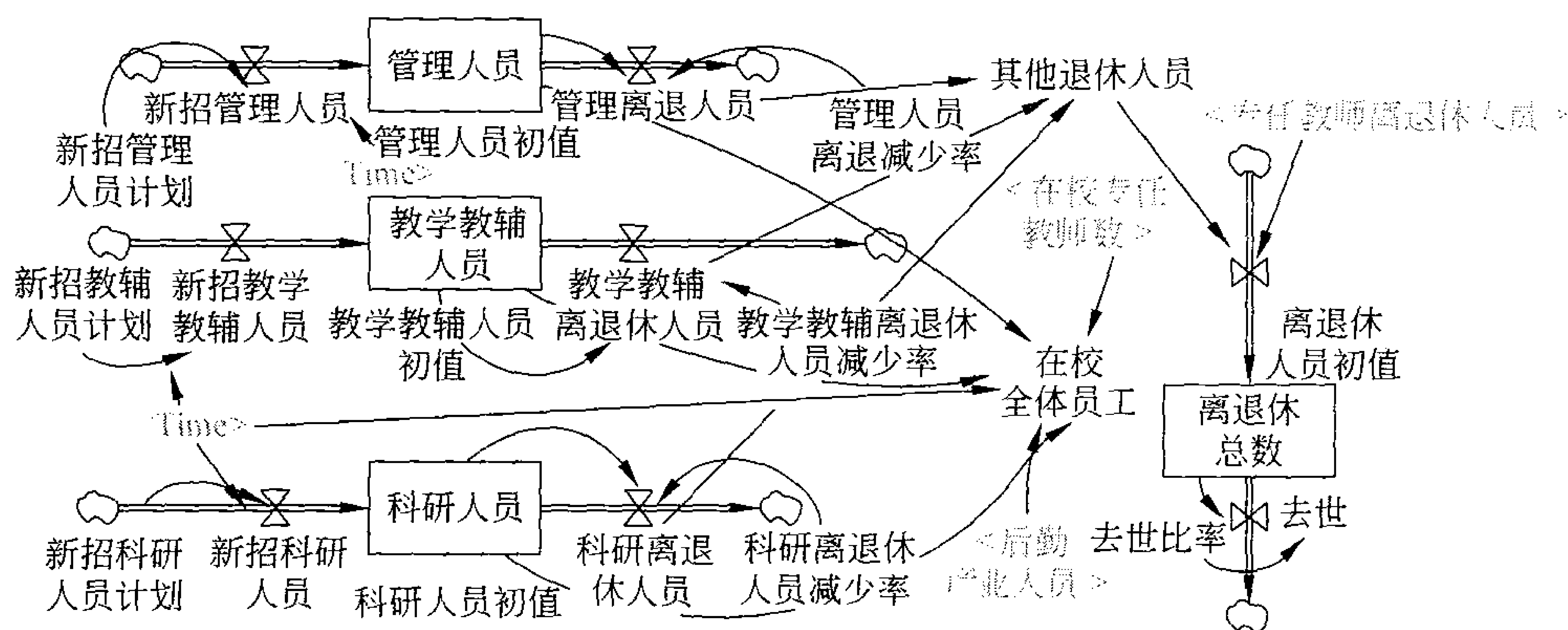
(16) 离退休总数＝INTEG(其他退休＋专任教师离退休人员－去世,离退休初值)

(17) 在校全体员工＝在校专任教师数＋管理人员＋教学教辅人员＋科研人员＋后勤产业人员(Time)





(a) 教师人力资源子系统流图 (1)

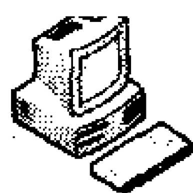


(b) 教师人力资源子系统流图 (2)

图　7-16

通过对教师人力资源子系统的因素进行分析，建立了系统流图和基本方程之后，可结合具体的实例数据，在系统动力学建模步骤的具体指导下，借助于仿真软件，对高校教师人力资源子系统预测系统动力学模型进行政策试验。

建立了系统动力学模型以后，在进行计算机仿真之前，需要确定模型中方程式的所有参数，这些参数包括常量、表函数、水平变量初值等。通过调查搜集所需的数据资料；利用专业知识，在往年的统计数据基础上，运用统计方法、预测技术、会计方法及其他数学方法对模型参数进行估计。有些参数的取值是根据对高校的调研情况收集而来，有些参数是



通过模拟试验法来确定的(以 2005 年度资料为模拟初始值,模拟期间为 2006 年至 2015 年)。

常量参数为:

讲师进入副教授的比率 0.08 Dmnl

讲师减员率 0.03 Dmnl

聘请校外教师折合比例 0.5 Dmnl

引进助教人才强度 2.75 Dmnl

表函数,可有效地处理系统变量之间的非线性关系问题,它们在确定时主要依照以下原则:

(1) 根据高校实际背景和获得数据的难易程度以及灵敏度、精确度的要求确定自变量变化范围及取值范围。

(2) 建立表函数时大致要考虑曲线的斜率与形状,一个或一个以上的特殊点供参考。

(3) 设置曲线的斜率,使之与其所表示的影响的性质相吻合,负值斜率代表负反馈,正值斜率代表正反馈。

(4) 选择曲线的形状,小心确定在极端条件下和曲线中部的斜率与曲率的值。曲线趋于平坦的部分对应于影响减弱与饱和的情况,而陡急升降的部分对应于影响与效应增强的情况。

2005 年 12 月 31 日有关在校教职工的基本数字如表 7-3 所示(单位:人)。

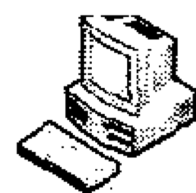
表 7-3　在校教职工基本数字表

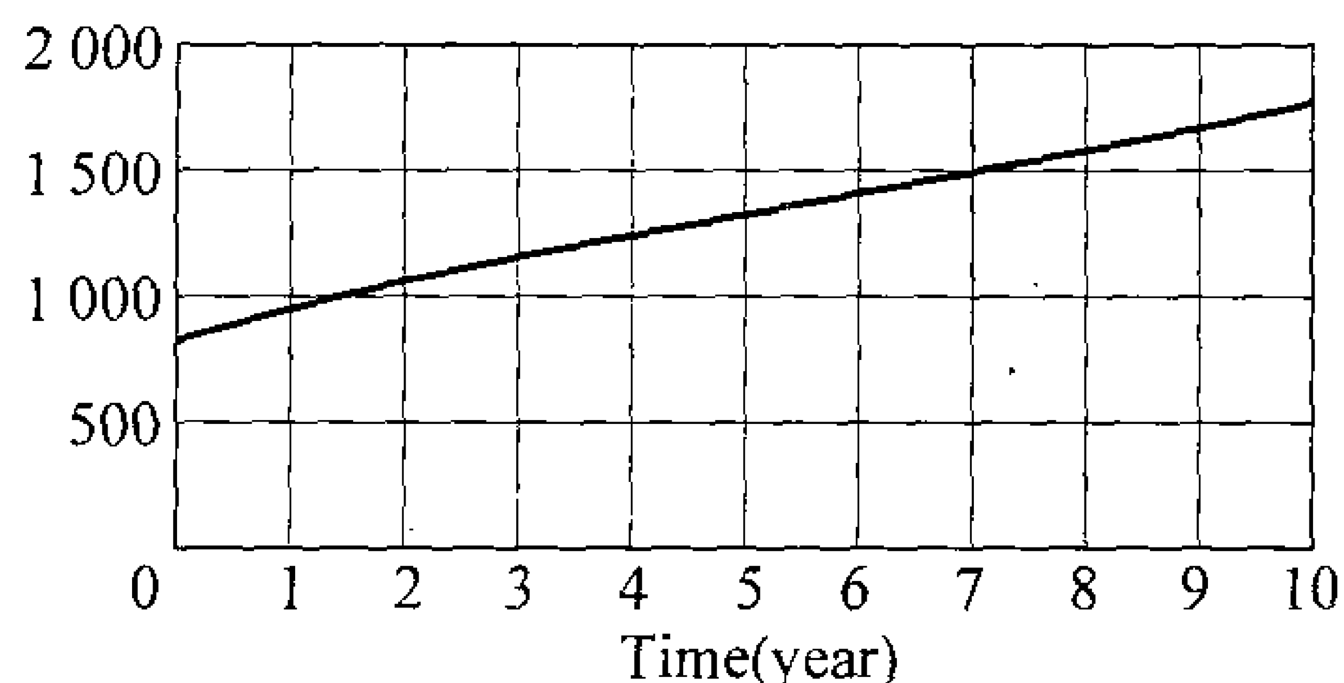
各类在校职工	人　数	各类在校职工	人　数
助教	230	教学教辅人员	100
讲师	200	科研人员	3
副教授	220	离退休人员	600
教授	88	管理人员	200

运用研究对象 2005 年的一些初始资料,以及根据上述方程式及其一系列参数的设置,并把它输入到模型后可以进行仿真分析及预测(目前,常用的系统动力学仿真软件有 Vensim 等)。

专任教师、管理人员、教学教辅人员、科研人员的模拟曲线见图 7-17。

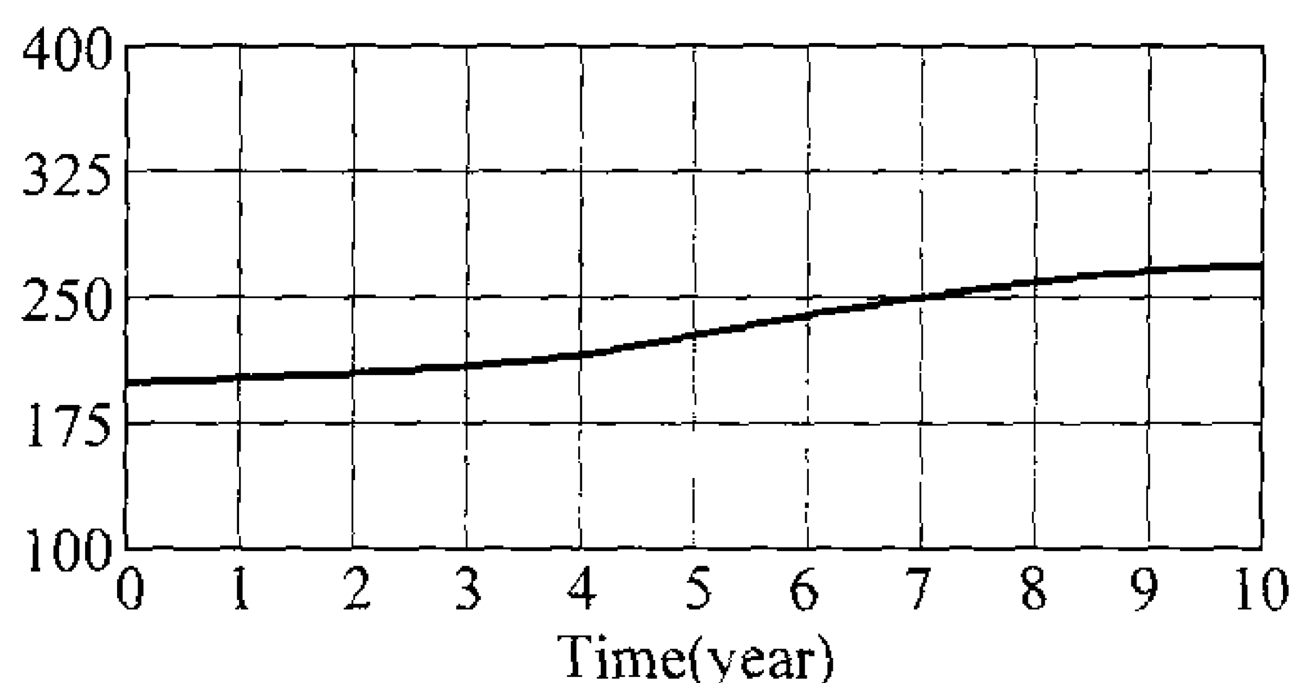
从图 7-17 中可以看出在预测周期的前 5 年,学校专任教师在 1 100 人左右,管理人员 230 人左右,教学教辅人员达到 130 人左右,科研人员达到 30 人左右。这种变化趋势基本与研究对象的政策方针相一致。





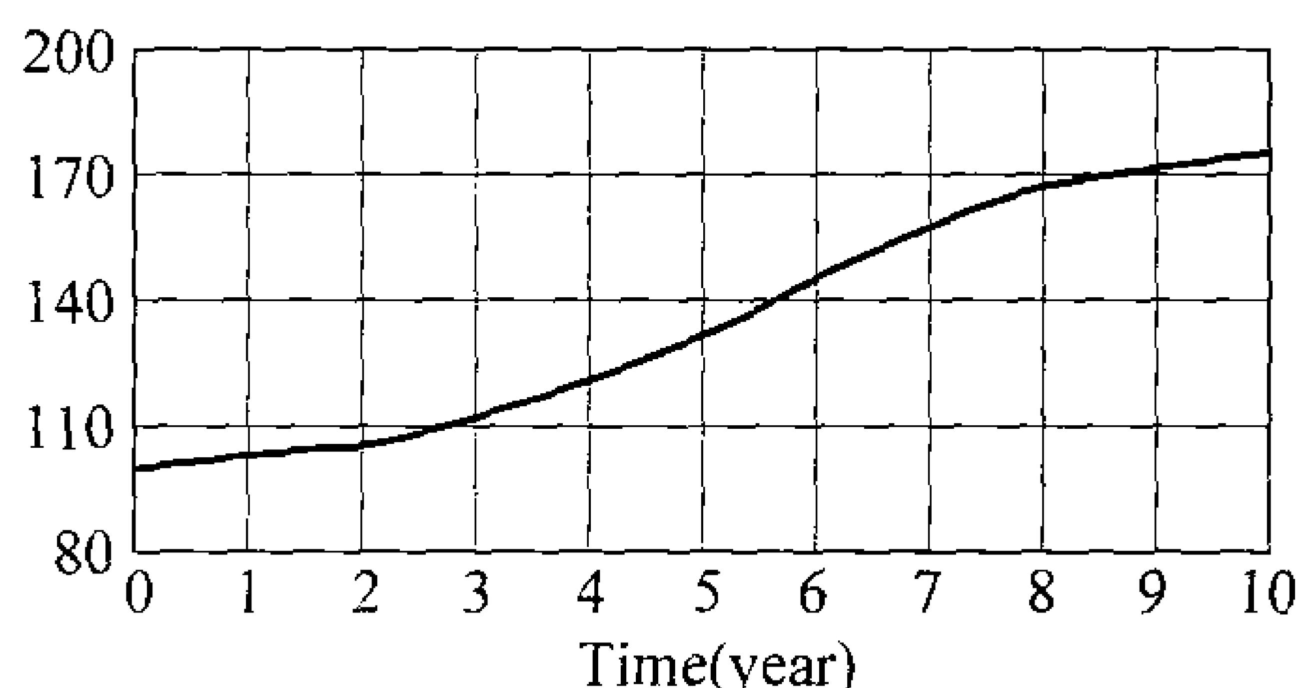
专任教师． current——————人 /year

(a) 专任教师总数



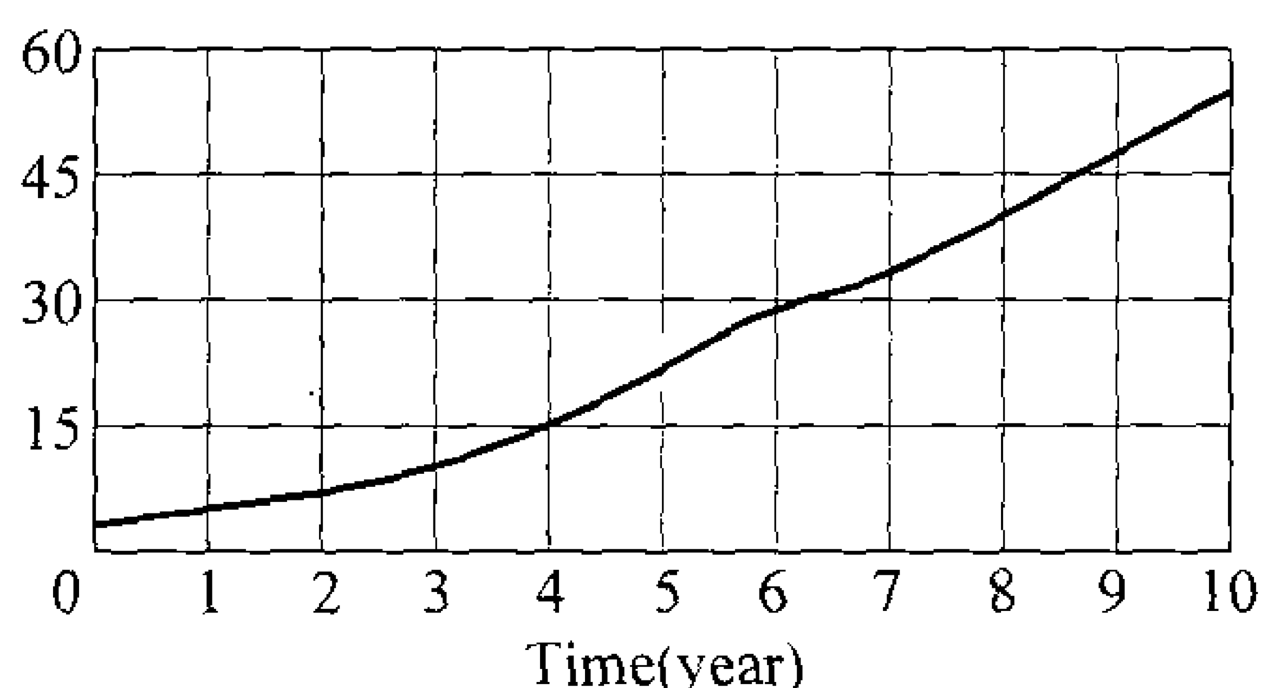
管理人员： current——————人 /year

(b) 管理人员总数



教学教辅人员： current——————人 /year

(c) 教学教辅人员总数



科研人员： current——————人 /year

(d) 研究人员总数

图　7-17

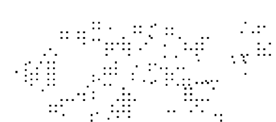


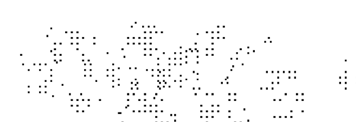
本章小结

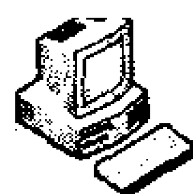
系统动力学是认识某类复杂问题的一种方法学。它的发展可以追溯到 20 世纪 50 年代兴起的工业动力学，当时主要用于解决企业中出现的一些有关经营管理的问题。在短短的几年中，工业动力学的方法已得到了广泛的应用，如经营管理某个“研究与开发”规划，解决城市的萧条与衰退问题，认识有限的、正在减少的自然资源中出现的指数增长的含义等，甚至对糖尿病理论的检验也用到了工业动力学。

系统动力学研究问题从系统内部微观结构入手，建立 SD 数学模型。运用计算机技术，并按时间步长(足够小)法模拟上机运行。根据前一时刻系统状态，估算出下一时刻系统状态，一步步展现系统动态演变过程。系统动力学模拟时间可长可短，以长为好，尤其适用中长期预测预报，这一特性对具有大惯性的社会经济系统的模拟尤为珍贵。

从系统动力学的观点来研究问题，大致可分为以下 7 个阶段：问题的识别与定义、系统的概念化、模型格式化、模型行为的分析、模型评价、策略分析、模型的使用或执行。



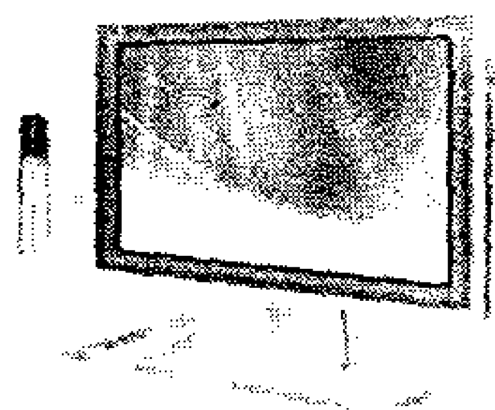






思考题

1. 系统动力学方法的应用对象主要有哪些?
2. 如何判定流图中的正反馈和负反馈?
3. 试用系统动力学方法分析现实生活中的问题。



第8章 神经网络系统预测

本章关键词

系统预测(system prediction)　神经网络(neural network)

本章要点

通过本章的学习与编程,使学生了解系统预测方法的分类,重点掌握神经网络预测模型方法的特点和应用领域,能够在实际应用中正确使用神经网络模型、结构、学习算法、训练方法和学习样本。掌握神经网络的工作原理、主要特征、应用领域,初步掌握利用MATLAB进行神经网络设计与应用。

8.1 系统预测概述

预测就是对未来事件进行预计,它既是一门科学,又是一门艺术。预测是重要的,预测是为决策服务的。在政府、经济、商业、金融以及其他许多领域,预测有着广泛的应用。本章将利用系统的、定量的方法进行预测,并对预测结果进行评估。

8.1.1 系统预测的应用领域

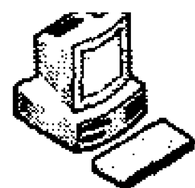
首先了解预测的应用领域,可以了解预测方法的应用对象,弄清预测方法的研究目标,明确预测如何为决策提供服务。

1. 经营管理领域

企业往往会对产品的销售状况进行预测,以便加强对产品库存、销售队伍、生产计划等方面的管理,同时也为产品的定价、广告的开支、产量的增减、市场的开拓等决策提供有力的支持。企业可以根据预测结果决定生产什么、何时生产、何地生产等。企业也可以对生产的投入要素、产品的需求和供给进行预测,以便为生产决策提供科学的依据。

2. 社会经济领域

政府机关和政策研究部门对宏观经济变量GDP、失业、消费、投资、价格、利率等方面



的预测已成为一项例行的工作，专业研究人员对商业周期、证券市场、外汇市场等的状况进行预测。根据这些预测结果，政府可以制定相应的财经政策和货币政策，企业可以进行战略规划。

3. 金融投机领域

在资本市场上，投资商和投机者对股票收益、利率、汇率、商品价格等资本收益及其波动性的预测有着浓厚的兴趣，也成为他们工作中的一项常规分析内容。但是，类似能否成功地预测资本收益及其波动性的争论从来没有停止过。这里，我们不期望开发出金融市场中点石成金的预测方法，但却希望能够利用先进的、成熟的技术研究和解释金融数据的变化模式。

4. 人口统计领域

各个国家和地区都会定期地按照年龄、性别、种族等分类对人口进行预测，人口数量又往往与出生、死亡、人口流动等因素紧密相关。政府部门则根据人口预测的结果，规划在基础设施建设、社会保障、医疗保健、扶贫救助等方面的开支，调整在这些方面的政策等。

当然，预测的应用远远不止这些，例如在政府的预算、政府的税收、流行性传染疾病的预报等许多方面都有着非常准确的预测。

8.1.2 系统预测的概念

系统预测就是根据系统发展变化的实际数据和历史资料，运用科学的理论、方法和各种经验、判断、知识，去推测、估计、分析事物或现象在未来一定时期内的可能变化情况。其建立在对事物历史与现状的调查上，建立在对有关主要因素分析的基础上。

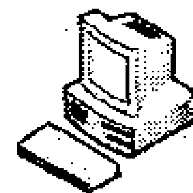
预测的实质是充分分析、理解待测系统及其有关主要因素的演变，以便找出系统发展变化的固有规律，根据过去、现在估计未来，根据已知预测未知，从而推断该系统的未来发展状况。

8.1.3 系统预测方法的分类

由于预测的对象、时间、范围、性质等不同，预测的技术是繁杂多样的，预测的方法则可以形成多种不同的分类。但预测的核心技术不过是由若干工具所构成，而且预测的基本原理也无太大差异，所以我们关注的是预测的核心原理。我们根据方法本身的性质特点将预测方法分为三类。

1. 定性预测方法

定性预测方法是根据人们对系统过去和现在的经验、判断和直觉进行预测，其中以人的逻辑判断为主，仅要求提供系统发展的方向、状态、形势等定性结果。



该方法适用于缺乏历史统计数据的系统对象，利用诸如市场调查、专家打分、主观评价等作出预测。

2. 时间序列分析

时间序列分析是指根据系统对象随时间变化的历史资料，只考虑系统变量随时间的变化规律，对系统未来的表现按照时间顺序进行定量预测。主要包括移动平均法、指数平滑法、趋势外推法等。

该方法适用于利用简单统计数据来预测研究对象随时间变化的趋势，例如企业的总产值、商品的销售额、城市的用电量、地区的降雨量等。

3. 因果关系预测

因果关系预测是指系统变量之间存在某种前因后果关系，找出影响某种结果的几个因素，建立因与果之间的数学模型，根据因素变量的变化预测结果变量的变化，既预测系统发展的方向又确定具体的数值变化规律。一般因果关系模型中因变量与自变量在时间上是同步的。其方法主要包括时间序列分析、线性回归分析、概率统计方法、计量经济学方法、系统动力学仿真、神经网络技术等。本章主要讨论使用神经网络方法进行的相关性预测。

8.2　神经网络预测方法

人的大脑是由很多复杂的神经元网络所组成的，正是因为这些神经网络的作用，人才能以很高的速度理解感觉器官传来的信息。为了解释人脑的奥秘，也为了提高目前人造机器的能力，人对人脑的工作机理进行了长期不懈的探索和模拟，逐渐发展起来了一门新兴的学科——人工神经网络。

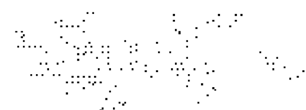
8.2.1　人工神经网络的概念

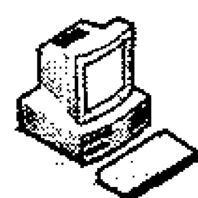
广义上讲，神经网络是泛指生物神经网络与人工神经网络这两个方面。

所谓生物神经网络是指由中枢神经系统（脑和脊髓）及周围神经系统所构成的错综复杂的神经网络，它负责对动物机体各种活动的管理，其中最重要的是脑神经系统。

所谓人工神经网络是指模拟人脑神经系统的结构和功能，运用大量的处理部件，由人工方式建立起来的网络系统。显然，人工神经网络是在生物神经网络研究的基础上建立起来的，人脑是人工神经网络的原型，人工神经网络是对脑神经系统的模拟。

“神经网络”这个词实际是来自生物学，而我们所指的神经网络正确的名称应该是“人工神经网络（artificial neural networks）”。在本章中，会同时使用这两个可以互换的术语。神经网络是模拟人脑神经活动进行学习、判断、推理的一种数学方法。它是由大量





的，同时也是很简单的处理单元（神经元）广泛地互相连接而形成的复杂网络系统，它反映了人脑功能的许多基本特性，是对人脑若干基本特性通过数学方法进行的抽象和模拟，是一种模仿人脑结构及其功能的非线性信息处理系统，但不是人脑神经网络系统的真实写照，而只是人脑的某种简化、抽象和模拟。

一个真正的神经网络是由数个至数十亿个被称为神经元的细胞所组成的，它们以不同方式连接而形成网络。人工神经网络就是尝试模拟这种生物学上的体系结构及其操作。

8.2.2 脑神经系统与生物神经元

1. 脑神经系统

关于神经网络的构成，早在1875年意大利解剖学家戈尔吉（C. Golgi）就用银渗透法最先识别出了单个的神经细胞。1889年卡贾尔（Cajal）创立神经元学说，认为整个神经系统都是由结构上相对独立的神经细胞构成的。据估计，人脑神经系统的神经细胞约为100亿个。

2. 生物神经元

1）生物神经元组成

神经细胞是构成神经系统的基本单元，称之为生物神经元，或简称为神经元。神经元主要由三个部分组成：细胞体、轴突、树突，如图8-1所示。

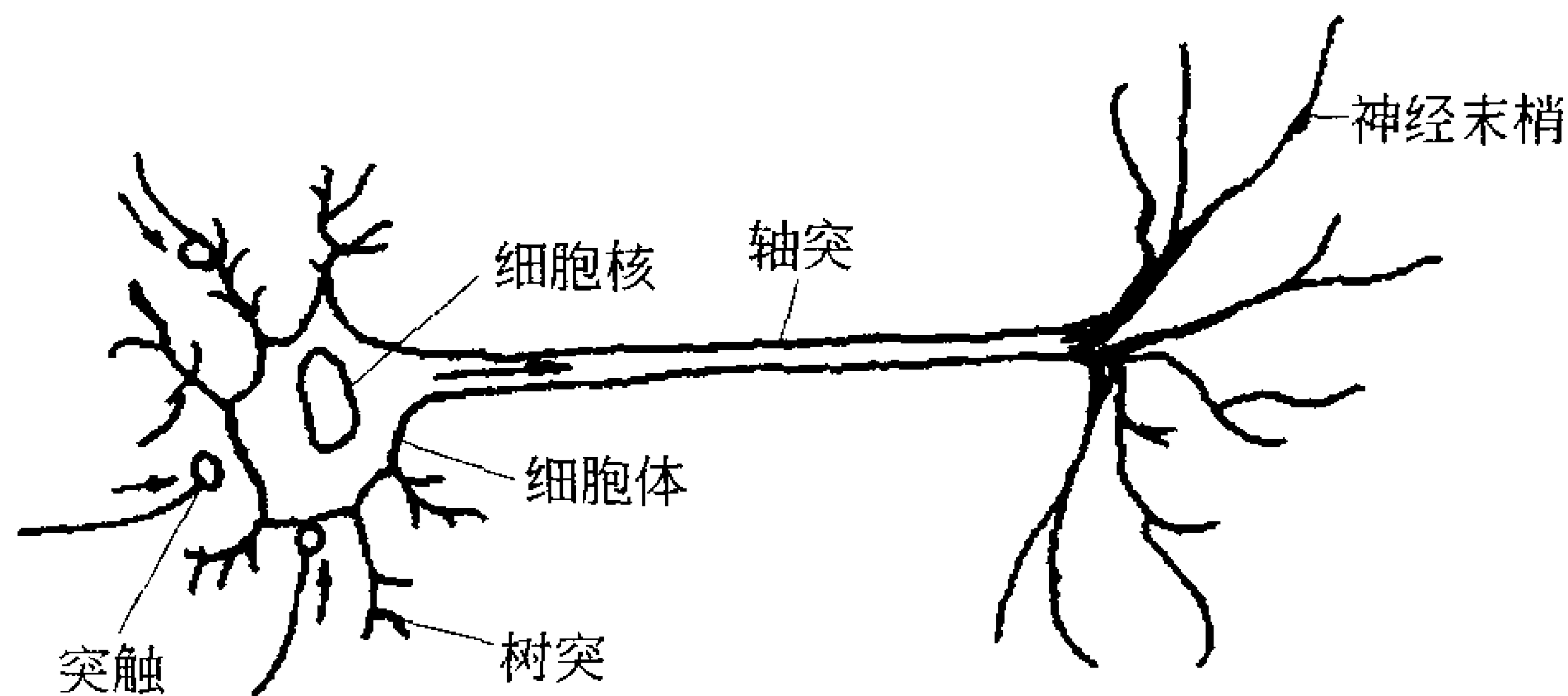


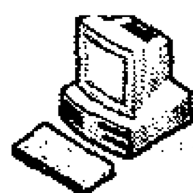
图8-1　生物神经元组成

（1）细胞体：由细胞核、细胞质与细胞膜等组成。它是神经元的新陈代谢中心，同时还用于接收并处理对其他神经元传递过来的信息。

（2）轴突：这是由细胞体向外伸出的最长的一条分支，每个神经元一个。长度最大可达1m以上，其作用相当于神经元的输出电缆，它通过尾部分出的许多神经末梢以及梢端的突触向其他神经元输出神经冲动。

（3）树突：这是由细胞体向外伸出的除轴突外的其他分支，长度一般均较短，但分支很多。它相当于神经元的输入端，用于接收从四面八方传来的神经冲动。

（4）突触：是神经元之间相互连接的接口部分，即一个神经元的神经末梢与另一个



神经元的树突相接触的交界面，位于神经元的神经末梢尾端。每个神经元都有很多突触，据测定，大多数神经元拥有突触的数量约在 $10^3 \sim 10^4$ 之间。而位于大脑皮层的神经元上突触的数目可达 3×10^4 以上。整个脑神经系统中突触的数量约在 $10^{14} \sim 10^{15}$ 之间。

2）神经元之间的联系

在神经系统中，神经元之间的联系形式是多种多样的。一个神经元既可以通过它的轴突及突触与其他许多神经元建立联系，把它的信息传递给其他神经元；亦可以通过它的树突接收来自不同神经元的信息。神经元之间的这种复杂联系就形成了相应的神经网络。

8.2.3　人工神经网络的特点

人脑是产生自然智能的源泉，是真正出色的并行计算机。人工神经网络（ANN）是在人类对其大脑认识理解的基础上人工构造的能够实现某种功能的神经网络。它是理论化的人脑神经网络的数学模型，是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种非算法的信息处理系统。

人工神经网络吸取了生物神经网络的许多优点，因而有其固有的特点。

(1) 高度并行性：人工神经网络是由许多相同的简单处理单元并联组合而成，其对信息的处理能力与效果惊人。

(2) 高度非线性全局作用：人工神经网络每个神经元接收大量其他神经元的输入，并通过并行网络产生输出，影响其他神经元。网络之间的这种相互制约和相互影响，实现了从输入状态到输出状态空间的非线性映射。从全局的观点来看，网络整体性能不是网络局部性能的简单叠加，而表现出某种集体性的行为。

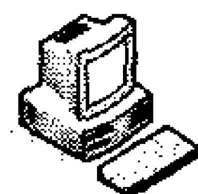
(3) 良好的容错性与联想记忆功能：人工神经网络通过自身的网络结构能够实现对信息的记忆，而所记忆的信息是存储在神经元之间的权值中。从单个权值中看不出所存储的信息内容，因而是分布式的存储方式，这使得网络具有良好的容错性，既能进行模式信息处理工作，又能进行模式联想等的模式识别工作。

(4) 十分强的自适应、自学习功能：人工神经网络可以通过训练和学习来获得网络的权值与结构，呈现出很强的自学习能力和对环境的适应能力。

8.2.4　人工神经网络发展的回顾

1. 萌芽期（20世纪40年代）

人工神经网络的研究最早可以追溯到人类开始研究自己的智能的时期，到1949年止。一般认为，最早用数学模型对神经系统中的神经元进行理论建模的是美国心理学家麦克洛奇（W. McCulloch）和数学家皮兹（W. Pitts）。他们于1943年建立了M-P神经元模型，发表于《数学生物物理学会刊》（*Bulletin of Mathematical Biophysics*）。M-P神经



元模型首次用简单的数学模型模仿出生物神经元活动功能，并揭示了通过神经元的相互连接和简单的数学计算，可以进行相当复杂的逻辑运算这一令人兴奋的事实。1949 年，心理学家 D. O. Hebb 提出神经元之间突触联系是可变的假说——Hebb 学习律。

2. 第一高潮期(1950—1968 年)

第一高潮期以 Marvin Minsky、Frank Rosenblatt、Bernard Widrow 等为代表人物，代表作是单级感知器(perceptron)。1957 年，美国计算机学家罗森布拉特(F. Rosenblatt)提出了著名的感知器模型。它是一个具有连续可调权值矢量的 M-P 神经网络模型，经过训练可达到对一定输入矢量模式进行识别的目的。1959 年，当时的另外两位美国工程师威德罗(B. Widrow)和霍夫(M. Hoff)提出了自适应线性元件(adaptive linear element，简称 adaline)。它是感知器的变化形式，尤其在权矢量的算法上进行了改进，提高了训练收敛速度和精度。他们从工程实际出发，不仅在计算机上模拟了这种神经网络，而且还做成了硬件，并将训练后的人工神经网络成功地用于小通信中的回波和噪声，成为第一个用于解决实际问题的人工神经网络。

3. 反思期(1969—1982 年)

1969 年，人工智能的创始人之一明斯基(M. Minsky)和帕伯特(S. Papert)在合著的《感知器》(《*Perceptron*》，MIT Press，1969 年)一书中对以单层感知器为代表的简单人工神经网络的功能及局限性进行了深入分析。他们指出，单层感知器只能进行线性分类，对线性不可分的输入模式无能为力，而其解决的办法是设计出具有隐含层的多层神经网络，但是要找到一个有效修正权矢量的学习算法并不容易。这一结论使得当时许多神经网络研究者感到前途渺茫，客观上对神经网络理论的发展起了一定的消极作用。

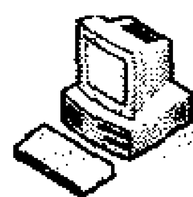
4. 第二高潮期(1983—1990 年)

美国学者霍普菲尔德(J. Hopfield)对人工神经网络研究的复苏起到了关键性的作用。1982 年，他提出了霍普菲尔德的网络模型，将能量函数引入到对称反馈网络中，使网络稳定性有了明显的判据，并利用提出的网络的神经计算能力来解决条件优化问题。另外，霍普菲尔德网络模型可以用电子模拟线路来实现，从而由此还兴起了对新一代电子神经计算机的研究。

1985 年，UCSD 的 Hinton、Sejnowsky、Rumelhart 等人所在的并行分布处理(PDP)小组的研究者在霍普菲尔德网络中引入了随机机制，提出所谓的 Boltzmann 机。

另一个突破性的研究成果是儒默哈特(D. E. Rumelhart)等人在 1985 年提出的解决多层神经网络权值修正的算法——误差反向传播法，简称 BP 算法，找到了解决明斯基和帕伯特提出的问题的办法，从而给人工神经网络增添了活力。

1987 年首届国际 ANN 大会在圣地亚哥召开，国际 ANN 联合会成立，创办了多种 ANN 国际刊物。1990 年 12 月，国内首届神经网络大会在北京举行。



5. 再认识与应用研究期(1991 年至今)

人工神经网络还存在一些不成熟的地方：应用面还不够宽，结果不够精确，存在可信度的问题。面对这些问题我们需要在以下几方面继续研究：

(1) 开发现有模型的应用，并在应用中根据实际运行情况对模型、算法加以改造，以提高网络的训练速度和运行的准确度。

(2) 充分发挥两种技术各自的优势是一个有效方法。

(3) 希望在理论上寻找新的突破，建立新的专用/通用模型和算法。

(4) 进一步对生物神经系统进行研究，不断地丰富对人脑的认识。

8.2.5　人工神经网络的应用领域

人工神经网络的实质反映了输入转化为输出的一种数学表达式，这种数学关系是由网络的结构确定的，网络的结构必须根据具体问题进行设计和训练。学习人工神经网络的关键在于掌握生物神经网络与人工神经网络建模的联系、人工神经网络的数学基础以及人工神经网络的应用。

以下根据一些文献的介绍，列出神经网络在一些主要领域的应用情况。

1. 模式信息处理和模式识别

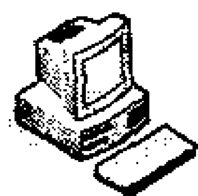
所谓模式，从广义上说，就是事物的某种特性类属，如图像、文字、声呐信号、动植物种类形态等信息。模式信息处理就是对模式信息进行特征提取、聚类分析、边缘检测、信号增强、噪声抑制、数据压缩等各种变换。模式识别就是将所研究客体的特性类属映射成"类别号"，以实现对客体特定类别的识别。人工神经网络特别适宜解算这类问题，形成了新的模式信息处理技术。它在各领域的广泛应用是神经网络技术发展的重要侧面。这方面的主要应用有：图形符号、手写体及语音识别，雷达及声呐等目标的识别，药物构效关系等化学模式信息辨识，机器人视觉、听觉，各种最近相邻模式聚类及识别分类等。

2. 最优化问题计算

人工神经网络的大部分模型是非线性动态系统，若将计算问题的目标函数与网络某种能量函数对应起来，网络动态向能量极小值方向移动的过程则可视作优化问题的解算过程，稳态点则是优化问题的局部或全局最优动态过程解。这方面的应用包括组合优化、约束条件优化等一类求解问题，如任务分配、货物调度、路径选择、组合编码、排序、系统规划、交通管理以及图论中各类问题的解算等。

3. 复杂控制

神经网络在诸如机器人运动控制等复杂控制问题方面有独到之处。较之传统数字计算机的离散控制方式，更适宜于组成快速适时自适应控制系统。这方面主要应用是多变



量自适应控制、变结构优化控制、并行分布控制、智能及鲁棒控制等。

4. 通信

神经网络的自学习和自适应能力使其成为对各类信号进行多用途加工处理的一种天然工具，尤其在处理连续时序模拟信号方面有很自然的适应性。这方面的主要应用有自适应滤波、时序预测、谱估计和快速傅里叶变换、通信编码和解码、信号增强和降噪、噪声相消、信号特增检测等。神经网络在作弱信号检测、通信、自适应滤波等方面的应用尤其引人注目，已在许多行业得到运用。

5. 预测和预报

在预测和预报方面的主要应用有经济发展预测、银行汇率预测、股市行情预测、洪水预测、交通状况预测等。

6. 智能决策和专家系统

美国一家公司应用自适应神经网络研制出一套航空管理与决策专家系统，实现航空收入的管理、航空市场的分析和预测等。

8.3 人工神经元

人工神经网络是由大量处理单元（人工神经元、处理元件、电子元件、光电元件等）经广泛互连而组成的人工网络，用来模拟脑神经系统的结构和功能。它是在现代神经科学研究的基础上提出来的，反映了人脑功能的基本特性。在人工神经网络中，信息的处理是由神经元之间的相互作用来实现的，知识与信息的存储表现为网络元件互连间分布式的物理联系，网络的学习和识别取决于各神经元连接权值的动态演化过程。

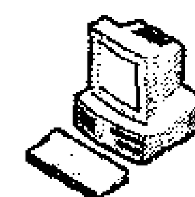
如同生物学上的基本神经元，人工神经网络也有基本的神经元。每个神经元有特定数量的输入，也会为每个神经元设定权重(weight)。权重是对所输入资料的重要性的一个指标。然后，神经元会计算出权重合计值(net value)，权重合计值就是将所有输入乘以它们的权重的合计。每个神经元都有它们各自的临界值(threshold)。当权重合计值大于临界值时，神经元会输出 1；相反，则输出 0。最后，输出会被传送给与该神经元连接的其他神经元继续剩余的计算。

构造一个模拟生物神经组织的人工神经网络的三要素如下。

(1) 对单个神经元给出定义。

(2) 定义网络结构：决定神经元数量及连接方式。

(3) 给出一种方法，决定神经元之间的连接强度。



8.3.1 人工神经元的基本构成

对于某个处理单元(神经元)来说,假设来自其他处理单元(神经元)i 的信息为 x_i,它们与本处理单元的互相作用强度即连接权值为 w_i, $i=0,1,\cdots,n-1$。那么本处理单元(神经元)的输入为 $\sum_{i=0}^{n-1} w_i x_i$,处理单元的输出为 $y=f\left(\sum_{i=0}^{n-1} w_i x_i\right)$。人工神经元的工作过程见图 8-2。式中,$x_i$ 为第 i 个元素的输入;w_i 为第 i 个处理单元与本处理单元的互联权重;f 称为激发函数或作用函数,它决定节点(神经元)的输出。

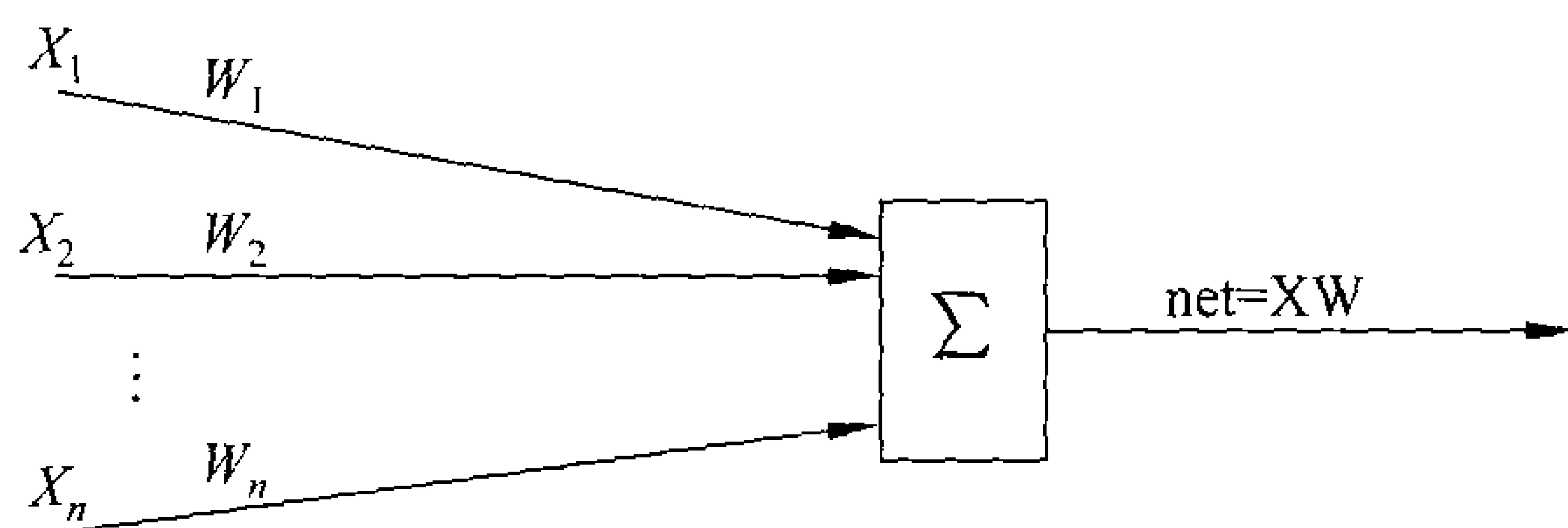


图 8-2 人工神经元的工作过程

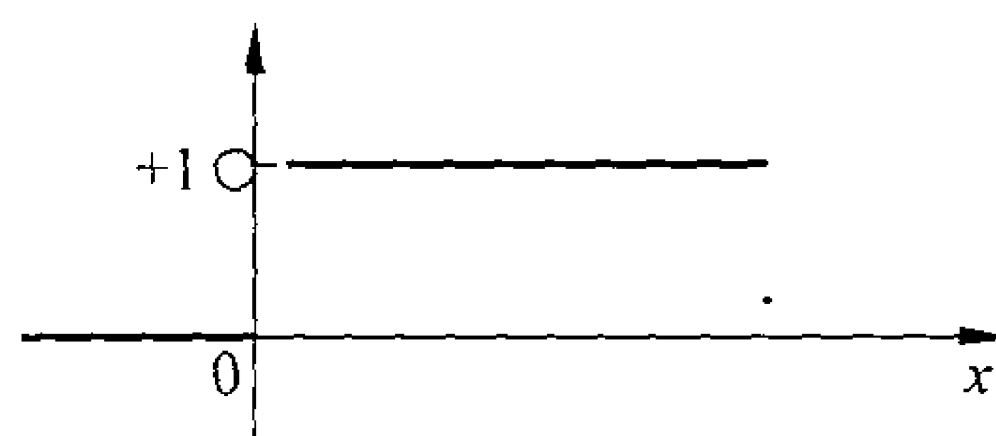


图 8-3 [0,1]阶梯函数

8.3.2 神经元作用函数

神经元的最基本作用函数有如下 4 种。

(1) [0,1]阶梯函数(见图 8-3)

$$f(x)=\begin{cases}1, & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases}$$

(2) [−1,1]阶梯函数

$$f(x)=\begin{cases}1, & x>0\\ -1, & x\leqslant 0\end{cases}$$

(3) (−1,1)S 型函数

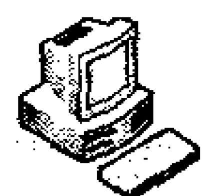
$$f(x)=\frac{1-\mathrm{e}^{-x}}{1+\mathrm{e}^{-x}}$$

(4) (0,1)S 型函数(见图 8-4)

$$f(x)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}}$$

8.3.3 M-P 模型

在对生物神经元的结构、特性进行深入研究的基础上,心理学家麦克洛奇(W. McCulloch)和数学家皮兹(W. Pitts)于 1943 年首先提出了一个简化的神经元模型,称为



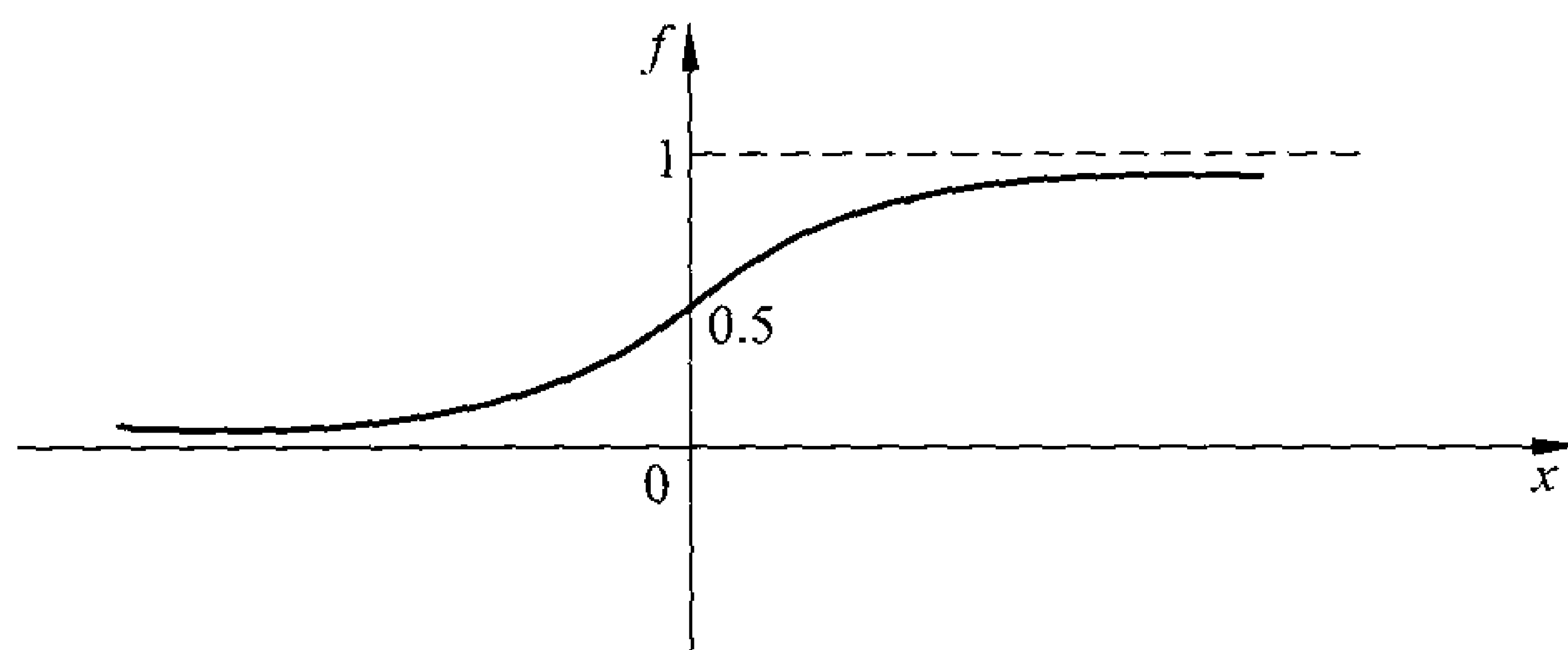


图 8-4 (0,1)S 型函数

M-P 模型,如图 8-5 所示。

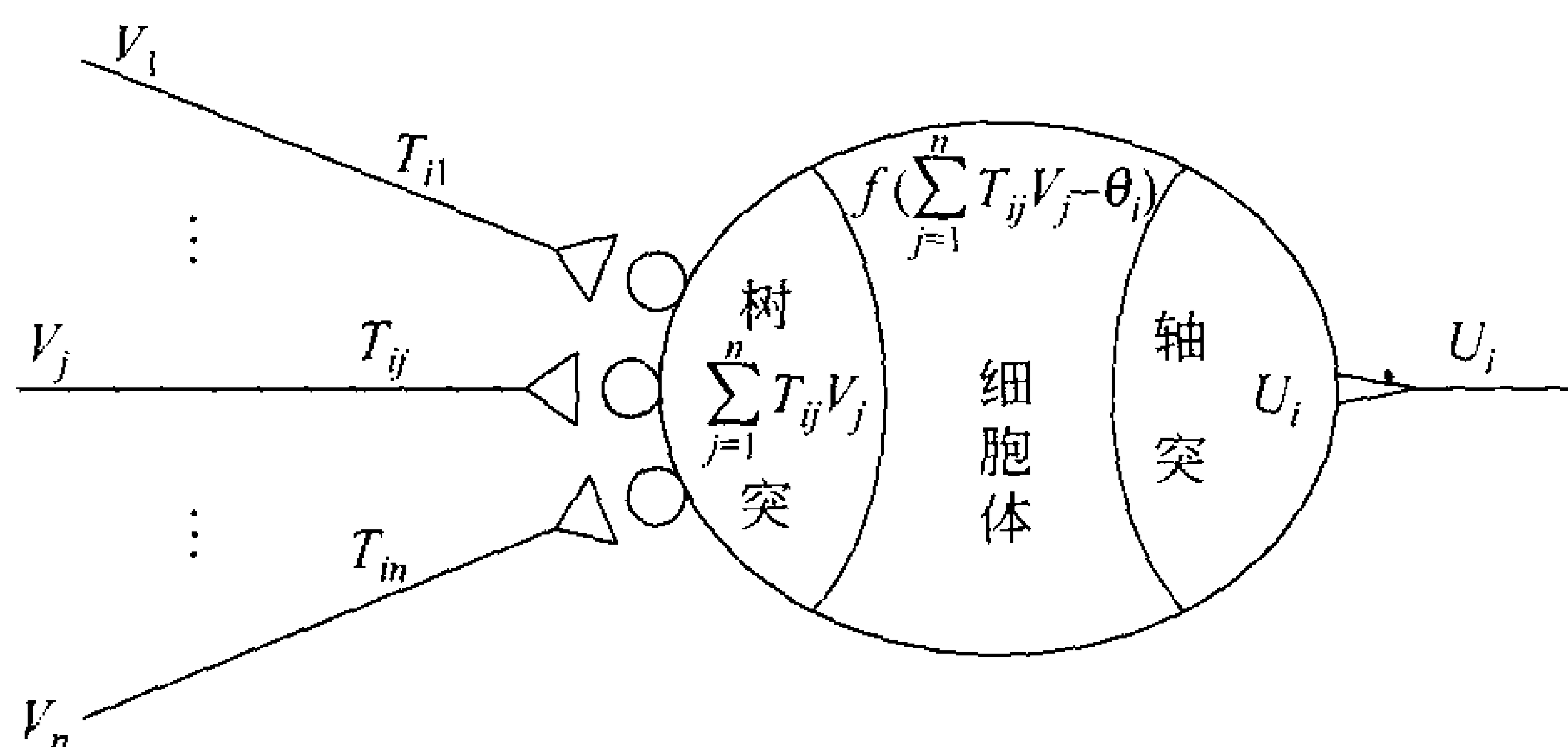


图 8-5 M-P 模型

其中:$V_1,V_2,\cdots,V_n$ 为输入;U_i 为该神经元的输出;T_{ij} 为外面神经元与该神经元连接强度(即权);θ 为阈值;$f(x)$ 为该神经元的作用函数。

M-P 模型方程为

$$U_i = f\left(\sum_j T_{ij}V_j - \theta_i\right), \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{8-1}$$

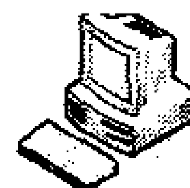
式中:T_{ij} 是神经元之间的连接强度,$T_{ii}=0$,$T_{ij}(i\neq j)$是可调实数,由学习过程来调整;θ_i 为阈值;$f(x)$是神经元作用函数。

若用 t 表示时间,$S_i(t)$表示第 i 个神经元在 t 时刻的状态,$S_i(t)=1$ 表示处于激发态,$S_i(t)=0$ 表示处于抑制态,W_{ij} 表示第 j 个神经元到第 i 个神经元的连接强度,可正可负。$\sum_t W_{ij}S_j(t)$ 表示第 i 个神经元在 t 时刻所接收到的所有信号的线性叠加。θ_i 表示神经元 i 的阈值,这时有

$$S_i(t+1) = f\left(\sum_t W_{ij}S_j(t) - \theta_i\right) \tag{8-2}$$

可以在模型中增加一个 $S_k(t)=1$ 神经元 k,并且 $W_{ik}=-\theta_i$,则阈值可归并到和号中去。

由此可见 M-P 模型已经捕捉到了神经元细胞的一个最基本的特征,即输入与输出之间的非线性关系,这当然不是指其具体函数形式。就功能上说,它已构成一个强有力的元



件。由这样的一些人工神经元组成的网络，如不强调速度和方便，可以像一台普通数字计算机一样，完成任何计算。

8.3.4　神经网络的拓扑结构

上一节介绍了单个生物神经元对信息的处理过程，建立了人工神经元的模型。单个神经元信息识别的能力是有限的，只能够反映极其简单的信息过程，只有将多个神经元组合起来，构成一个神经网络体系，才能够处理和识别复杂的信息流变化过程和相关机制，将多个神经元连接起来，就成为人工神经网络的拓扑结构。根据神经网络的拓扑结构和信息流在其中的传递方式，人工神经网络大致可以分为前馈网络、反馈网络和混合网络三种形式。

1. 前馈网络

前馈网络的信息流由输入层，逐级向下层传递，经网络处理后由输出层输出。中间没有信息反馈流。前馈网络的结构如图8-6所示。前馈网络可以用有向无环的图表示，网络的输出只与输入和网络的权重有关，而与以前的输出无关。

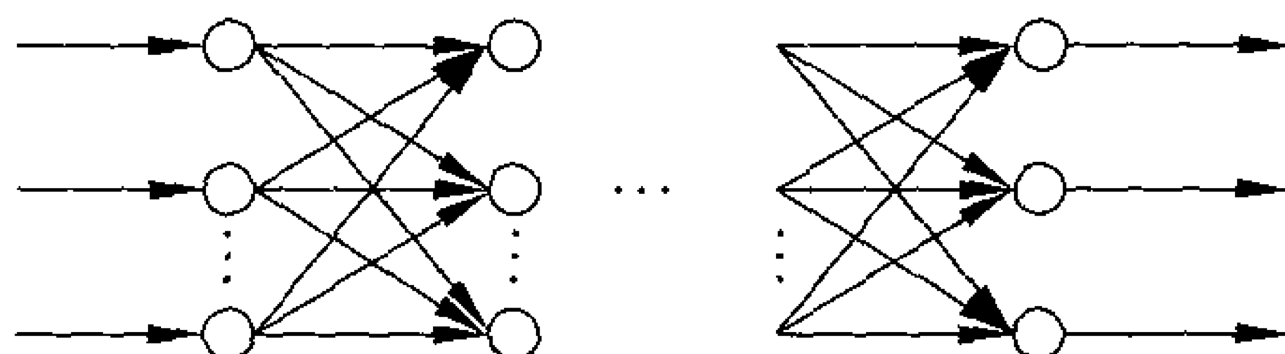


图8-6　前馈网络结构

2. 反馈网络

在反馈网络中，输出不仅与当前的输入有关，还与以前的输出有关。反馈网络的结构如图8-7所示。

3. 混合网络

混合网络就是网络的同一层中间相互有结合的网络。结构如图8-8所示。

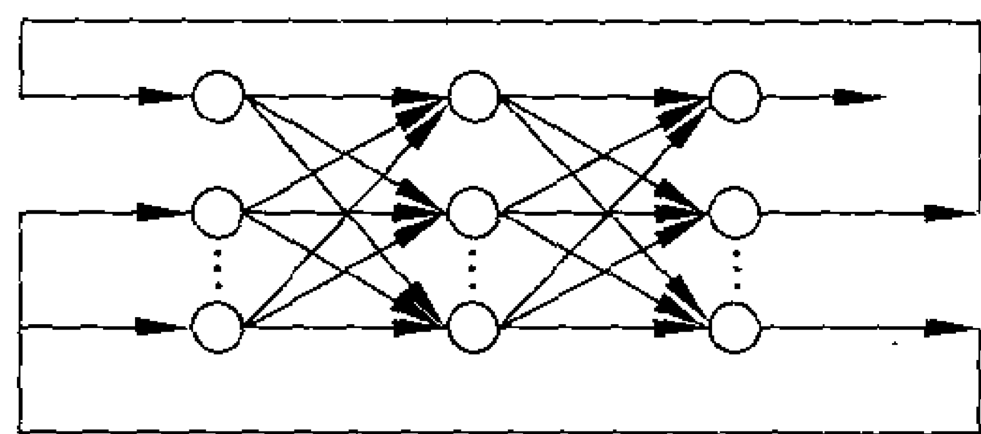


图8-7　反馈网络结构图

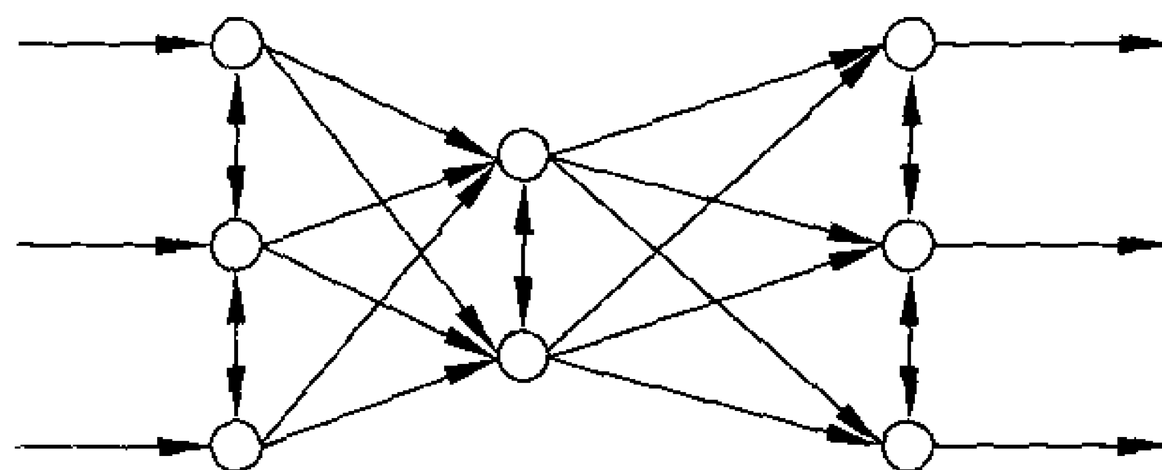


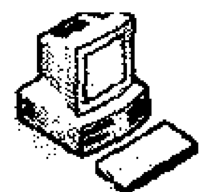
图8-8　混合网络结构图

8.3.5　神经网络的学习

1. 学习方式

通过向环境学习获取知识并改进自身性能是ANN的一个重要特点。按环境所提供信息的多少，网络的学习方式可分为三种。

(1) 监督学习：这种学习方式需要外界存在一个“教师”，它可对一组给定输入提供



应有的输出结果(正确答案)。学习系统可以根据已知输出与实际输出之间的差值(误差信号)来调节系统参数。

(2) 非监督学习：不存在外部“教师”，学习系统完全按照环境所提供数据的某些统计规律来调节自身参数或结构(这是一种自组织过程)。

(3) 再励学习：这种学习介于上述两种情况之间，外部环境对系统输出结果只给出评价(奖或惩)，而不是给出正确答案，学习系统通过强化那些受奖励的动作来改善自身的性能。

2. 学习算法

1) 误差纠正学习

误差纠正学习的最终目的是使某一基于误差信号的目标函数达到最小，以使网络中每一输出单元的实际输出在某种统计意义上最逼近应有输出。一旦选定了目标函数形式，误差纠正学习就成为一个典型的最优化问题。最常用的目标函数是均方误差判据。

2) Hebb 学习

神经心理学家 Hebb 提出的学习规则可归结为“当某一突触两端的神经元激活同步时，该连接的强度应增强，反之则应减弱”。描述这一思想最常用的一种数学表达式为：若 i 与 j 两种神经元之间同时处于兴奋状态，则它们间的连接应加强，即：

$$\Delta W_{ij} = \alpha S_i S_j, \quad \alpha > 0$$

这一规则与“条件反射”学说一致，并得到神经细胞学说的证实。

设 $\alpha=1$，

当 $S_i=S_j=1$ 时，$\Delta W_{ij}=1$；

在 S_i，S_j 中有一个为 0 时，$\Delta W_{ij}=0$。

3) 竞争学习

顾名思义，在竞争学习时网络各输出单元相互竞争，最后达到只有一个最强激活者。

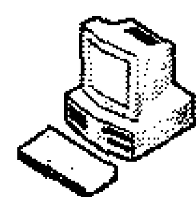
8.4 感知器模型

罗森勃拉特于 1957 年提出的感知器模型，把神经网络的研究从纯理论探讨引向了工程上的实现。它是最先提出来的网络模型，而且它提出的自组织、自学习思想及收敛算法对后来发展起来的网络模型都产生了重要的影响。

最初的感知器是一个只有单层计算单元的前向神经网络，由线性阈值单元组成，称为单层感知器，后来针对其局限性进行了改进，提出了多层感知器。

1. 线性阈值单元

线性阈值单元是前向网络(又称前馈网络)中最基本的计算单元，它具有 n 个输入



$(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，一个输出(y)，n 个连接权值$(w_1, w_2, \cdots, w_n)$，且符合下式：

$$y = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{n} w_i x_i - \theta > 0 \\ -1(\text{或 } 0), & \sum_{i=1}^{n} w_i x_i - \theta \leqslant 0 \end{cases} \tag{8-3}$$

2. 单层感知器及其算法

单层感知器只有一个计算层，它以信号模板作为输入，经计算后汇总输出，层内无互连，从输出至输入无反馈，是一种典型的前向网络。在单层感知器中，当输入的加权和大于阈值时，输出为 1，否则为 0 或－1。它与 M-P 模型的不同之处是假定神经元间的连接强度（即连接权值 w_{ij}）是可变的，这样它就可以进行学习。

学习的目的是调整连接权值，以使网络对任何输入都能得到所期望的输出。考虑仅有一个输出节点的情况，其中，x_i 是该输出节点的输入；w_i，$i=1,2,\cdots,n$，是相应的连接权值；$y(t)$是时刻 t 的输出；d 是所期望的输出，它或者为 1，或者为－1。学习算法如下。

(1) 给 $w_i(0)$，$i=1,2,\cdots,n$ 及阈值 θ 分别赋予一个较小的非零随机数作为初值。这里 $w_i(0)$表示在时刻 $t=0$ 时第 i 个输入的连接权值。

(2) 输入一个样例 $X=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$和一个所期望的输出 d。

(3) 计算网络的实际输出：

$$y(t) = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i(t) x_i - \theta\right) \tag{8-4}$$

(4) 调整连接权值：

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta[d - y(t)]x_i \tag{8-5}$$

此处 $0 < \eta \leqslant 1$，它是一个增益因子，用于控制调整速度。如果实际输出与已知的输出一致，表示网络已经作出了正确的决策，此时就无须改 $w_i(t)$的值。

(5) 转到第(2)步，直到连接权值 w_i 对一切样例均稳定不变时为止。

3. 多层感知器

只要在输入层与输出层之间增加一层或多层隐含层，就可得到多层感知器。在多层感知器模型中，只允许某一层的连接权值可调，这是因为无法知道网络隐含层的神经元的理想输出，因而难以给出一个有效的多层感知器学习算法。多层感知器克服了单层感知器的许多缺点，原来一些单层感知器无法解决的问题，在多层感知器中就可以解决。

8.5 BP 神经网络

迄今为止，人们已经提出了五十多种较为成功的神经网络，其中 BP 网络（back propagation NN）是当前应用最为广泛的一种人工神经网络，其结构简单，应用范围主要

在模式识别、分类、非线性映射、复杂系统仿真、过程控制等方面。BP 模型是一种用于前向多层神经网络的反馈学习算法，由儒默哈特(D. Ruvmelhar)等人于 1985 年提出。1987 年，Lapedes 和 Fayher 首次应用神经网络模型进行预测，开了神经网络预警的先河。BP 网络作为人工神经网络中的前馈型网络的核心部分，其由一个输入层、若干隐含层和一个输出层构成，层与层之间多采用全互连方式，同层节点没有任何耦合；各层由若干个神经元(节点)构成，每一个节点的输出值由输入值、作用函数和阈值决定。隐含层的功能是为网络能学习到给定的[输入，输出]样本而提供足够的可调连接权值。这些可调连接权值在反复学习迭代过程中，从其巨大的可能组合数空间中凑成了一组能同时满足各[输入，输出]样本对的连接权值配置方案。而后在网络工作阶段有待测试样本输入时，即按“类似输入产生类似输出”的相近原则，推出所需要的输出来。作为一种有监督的学习算法，BP 网络能通过比较样本经网络学习后的实际输出误差，反复调整权值和阈值，逐渐减少误差，达到指定精度。

8.5.1 BP 神经网络的多层结构

1. 特点

BP 网络是一种单向传播的多层前向网络，是一种具有三层或三层以上的神经网络，包括输入层、中间层(隐含层)和输出层。上下层之间实现全连接，每层神经元之间无连接。当一对学习样本提供给网络后，神经元的激活值从输入层经各中间层向输出层传播，在输出层的各神经元获得网络的输入响应。接下来，按照减少目标输出与实际误差的方向，从输出层经过各中间层逐层修正各连接权值，最后回到输入层，这种算法称为“误差逆传播算法”，即 BP 算法。随着这种误差逆传播修正的不断进行，网络对输入模式响应的正确率也不断上升。

2. 各层神经元个数的确定

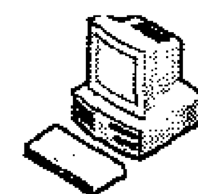
1) BP 网络模型输入和输出节点的选择

输入层、输出层的神经元个数由研究对象的输入、输出信息来确定。

2) BP 网络模型隐含层神经元数的选择

在实际应用中，如何确定隐含层和层内节点数，一直是确定 BP 网络结构的重点和难点，也是一个十分复杂的问题。隐含层和隐含层单元数难以确定，也是 BP 网络在拓扑结构上的主要缺陷。

隐含层单元数的选择是一个十分复杂的问题。不仅仅由于神经网络的巨量并行分布结构和非线性动态特性，而且还与具体问题的要求、输入输出单元的多少都有直接的关系。因此，要想从理论上得到一个简单通用的有关其特性、容量一类的简洁解析表达式或隐含层单元确定公式等都是十分困难的。然而，通过广泛和长期的应用过程所得的一些定性结论会有助于合理安排隐含层的单元数。因此，我们综合参考下述经验公式确定具



体的单元数：

$$n_H = \sqrt{n+m} + \alpha$$

$$n_H = \sqrt{n \cdot m}$$

$$n_H = (n+m)/2$$

$$n_H \leqslant \sqrt{m(n+3)} + 1$$

$$n_H > \log_2 m$$

$$n_H = \sqrt{0.43mn + 0.12n^2 + 2.54m + 0.77n + 0.35} + 0.51$$

式中：n_H 为隐含层神经元数；α 为 1～10 之间的常数；m 为输入神经元数；n 为输出神经元数。

通过上述结果的判断，最后确定出隐含层神经元数。

图 8-9 即为典型的三层 BP 前馈网络结构模型。

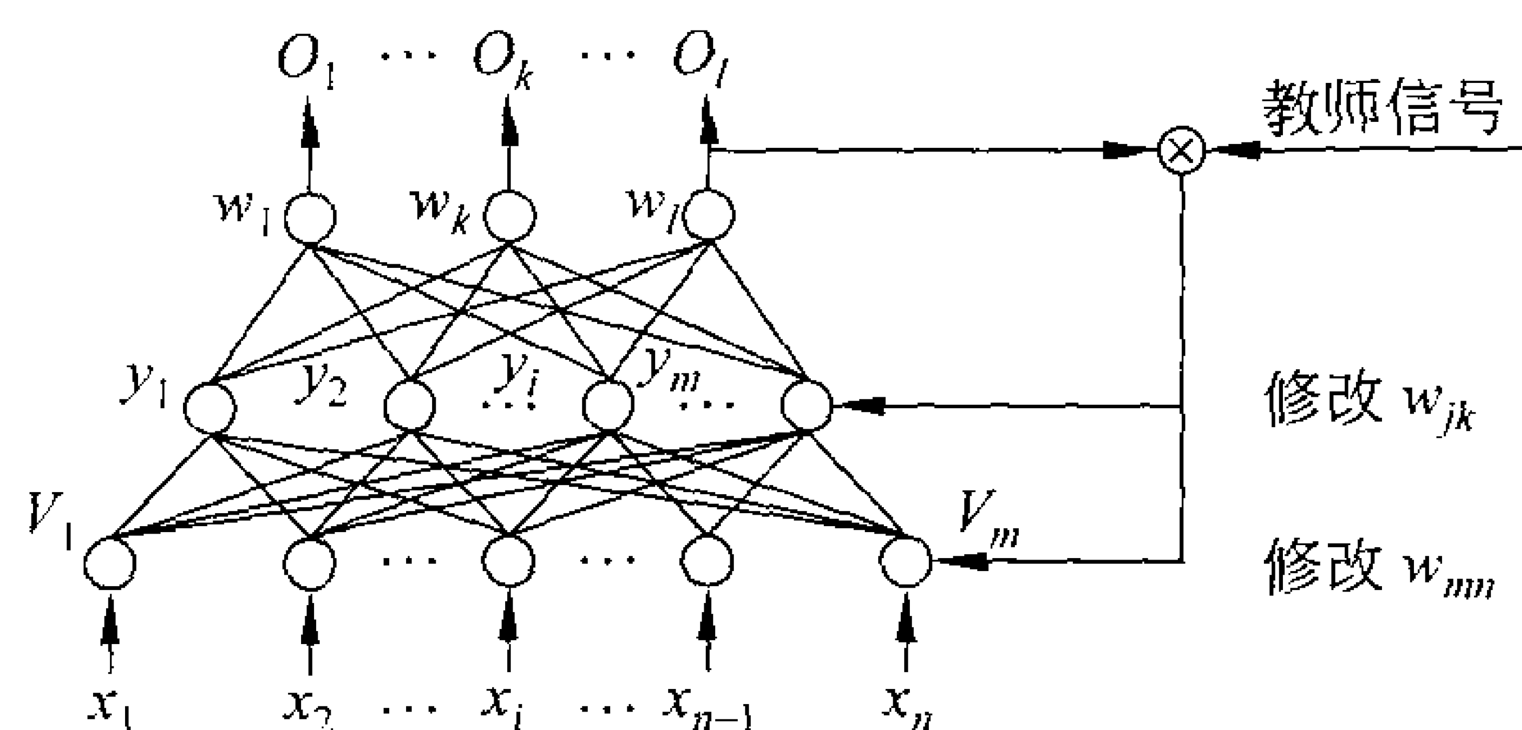
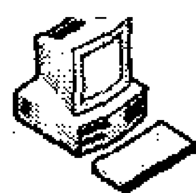


图 8-9　BP 神经网络结构模型

图 8-9 中，输入向量为 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$；隐含层输出向量为 $\boldsymbol{Y}=(y_1,y_2,\cdots,y_j,\cdots,y_m)^{\mathrm{T}}$；输出层输出向量为 $\boldsymbol{O}=(o_1,o_2,\cdots,o_k,\cdots,o_l)^{\mathrm{T}}$；期望输出向量为 $\boldsymbol{D}=(d_1,d_2,\cdots,d_k,\cdots,d_l)^{\mathrm{T}}$。输入层到隐含层之间的权值矩阵用 $\boldsymbol{V}$ 表示，$\boldsymbol{V}=(v_1,v_2,\cdots,v_j,\cdots,v_m)^{\mathrm{T}}$，其中列向量 $\boldsymbol{v}_j$ 为隐含层第 j 个神经元对应的权向量；隐含层到输出层之间的权值矩阵用 $\boldsymbol{W}$ 表示，$\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_k,\cdots,w_l)^{\mathrm{T}}$，其中列向量 $\boldsymbol{w}_k$ 为输出层第 k 个神经元对应的权向量。图 8-10 即为 BP 网络算法的信号流向。

由图 8-10 所示的网络结构可以看出，前向过程是：输入信号 $\boldsymbol{X}$ 从输入层进入后，通过隐含层各节点的内层权向量 $\boldsymbol{v}_j$ 得到该层的输出信号 $\boldsymbol{Y}$；该信号向前输入到输出层，通过其各节点内星权向量 $\boldsymbol{w}_k$ 得到该层输出 $\boldsymbol{O}$。反向过程是：在输出层期望输出 $\boldsymbol{D}$ 与实际输出 $\boldsymbol{O}$ 相比较得到误差信号 δ^o，由此可计算出输出层权值的调整量；误差信号 δ^o 通过隐含层各节点的外星权向量反传至隐含层各节点，得到隐含层的误差信号 δ^y，由此可计算出隐含层权值的调整量。由此反复学习训练，得到最后的理想权重。其中，η 为学习率，取值范围通常在 0.01～0.9 之间。一般来说，学习率越小，训练次数越多。但学习率过大，会影响网络结构的稳定性。



式中：T_{ij} 连接权值，节点阈值 θ_l。

2）输出层（隐节点到输出节点间）的修正公式

（1）输出节点的期望输出 t_l。

（2）误差控制。

所有样本误差：

$$E = \sum_{k=1}^{P} e_k < \varepsilon$$

其中一个样本误差为

$$e_k = \sum_{l=1}^{n} | t_l^{(k)} - O_l^{(k)} |$$

式中：P 为样本数；n 为输出节点数。

（3）误差公式：

$$\delta_l = (t_l - O_l) \cdot O_l \cdot (1 - O_l)$$

（4）权值修正：

$$T_{li}(k+1) = T_{li}(k) + \eta \delta_l y_i$$

式中 k 为迭代次数。

（5）阈值修正：

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta \delta_l$$

3）隐节点层（输入节点到隐节点间）的修正公式

（1）误差公式：

$$\delta_i' = y_i(1 - y_i) \sum_l \delta_l T_{li}$$

（2）权值修正：

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \eta' \delta_i' x_j$$

（3）阈值修正：

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta' \delta_i'$$

8.5.3 BP 模型算法示意图

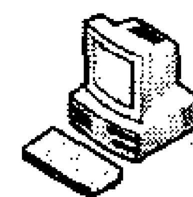
BP 模型算法示意图如图 8-12 所示，包括三部分内容。

（1）隐节点、输出节点的输出信息（y_l，O_l）的计算。这是由下而上进行的。

（2）输出节点、隐节点的误差（δ_l，δ_i）的计算。

（3）网络权值的修正与阈值的修正。

例 8-1 对如下神经网络，写出它的计算公式（含学习公式），并对其初始权值以及样本 $x_1=1$，$x_2=0$，$d=1$ 进行一次神经网络计算和学习（该系数 $\eta=1$，各点阈值为 0）。



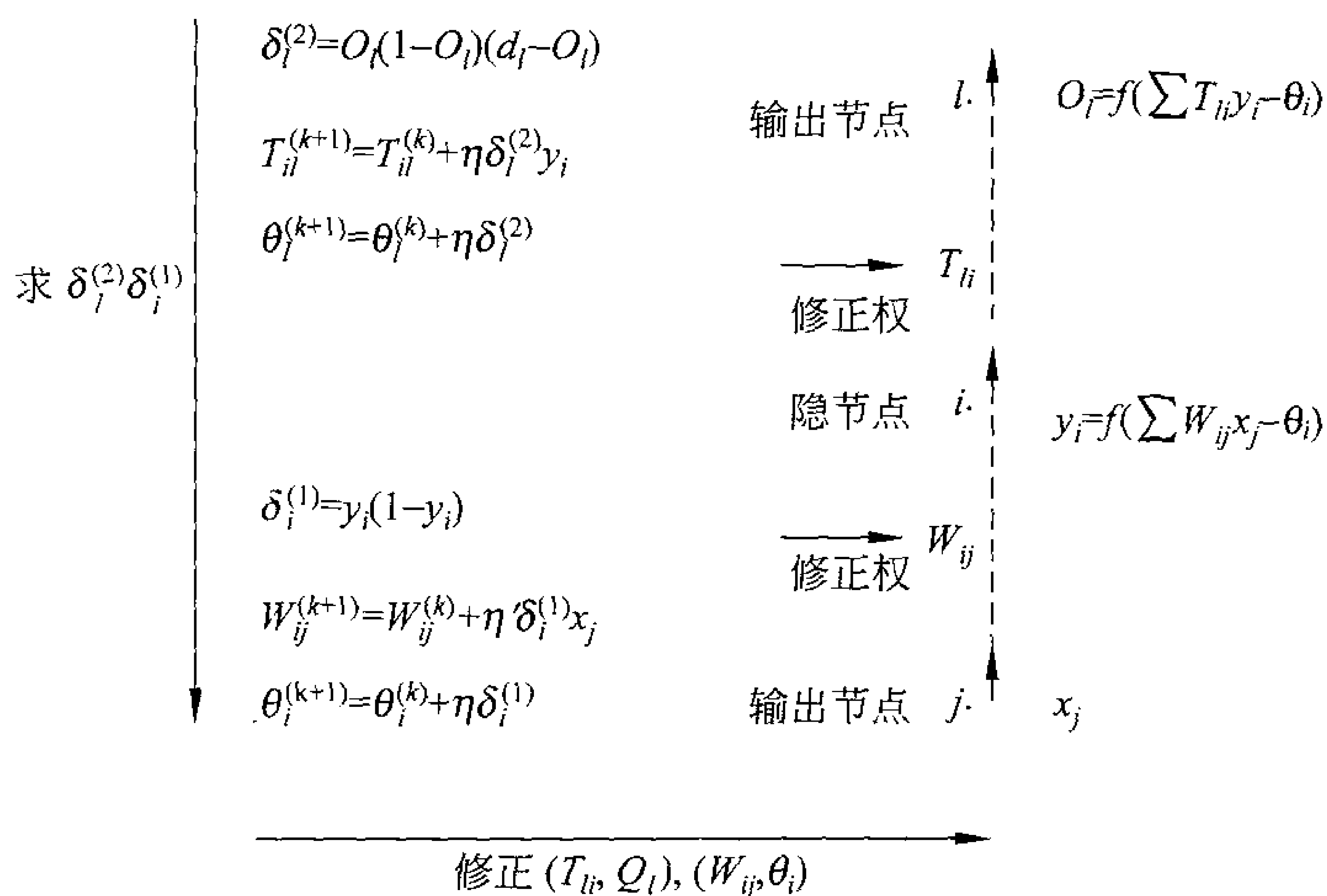
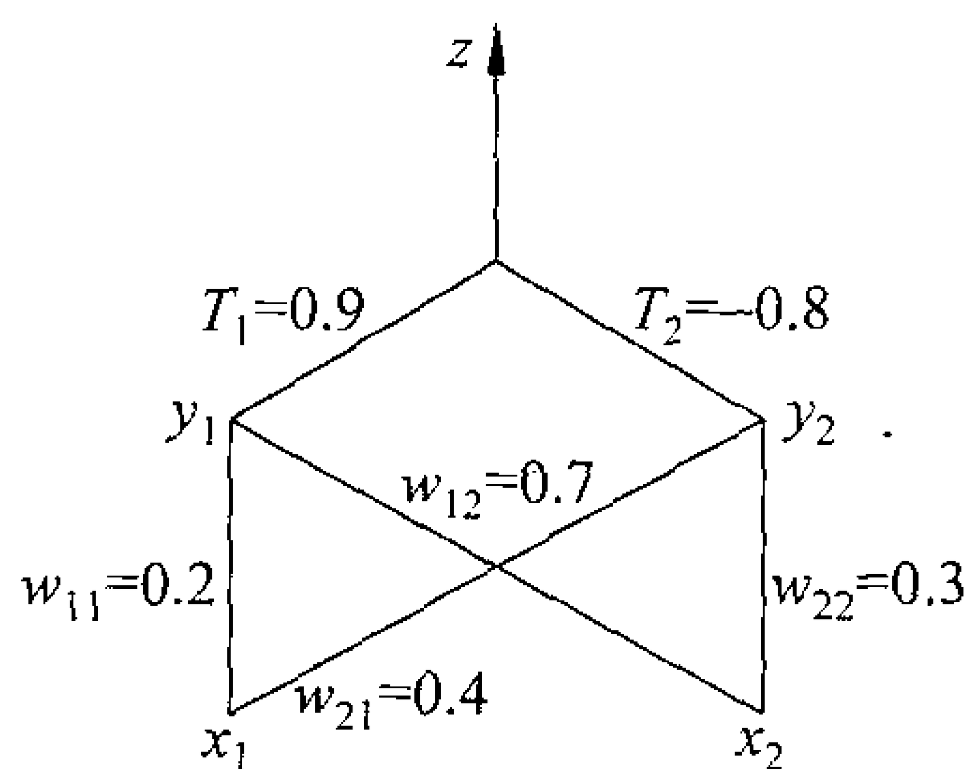


图 8-12　BP 模型算法示意图



作用函数简化为

$$y=f(x)=\begin{cases}1 & x\geqslant 0.5\\ x+0.5 & -0.5<x<0.5\\ 0 & x\leqslant -0.5\end{cases}$$

解：

1. 网络对样本的信息处理

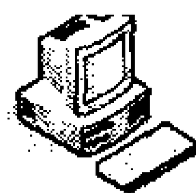
隐节点的输出公式：

$$y_i=f\left(\sum_j W_{ij}X_j-\theta_i\right)$$

在本题中，输入节点有两个，故 $j=1,2$；隐节点也有两个，故 $i=1,2$；各点阈值为 0，所以 $\theta_i=0$。因此，

$$y_1=f\left(\sum_j w_{ij}x_j\right)=f(0.2+0)=f(0.2)=0.7$$

$$y_2=f\left(\sum_j w_{ij}x_j\right)=f(0.4+0)=f(0.4)=0.9$$



输出节点的输出公式：

$$O_l = f(\sum_i T_{li} y_i - \theta_l)$$

在本题中，隐节点有两个，故 $i=1,2$；输出节点有一个，故 $l=1$；各点阈值为 0，所以 $\theta_l=0$。因此，

$$z = f(\sum_i T_i y_i) = f(0.7\times0.9+0.9\times(-0.8)) = f(-0.09) = 0.41$$

2. 权值修正

1）输出层

（1）z 的误差公式：

$$\delta_l = (t_l - O_l)\cdot O_l\cdot(1-O_l)$$

在本题中，输出节点有一个，故 $l=1,t=d=1$。因此，

$$\delta^{(2)} = z(1-z)(d-z) = 0.4\times(1-0.4)\times(1-0.4) = 0.4\times0.6\times0.6 = 0.144$$

（2）权值修正公式：

$$T_{li}(k+1) = T_{li}(k) + \eta\delta_l y_i$$

在本题中，隐节点有两个，故 $i=1,2$；输出节点有一个，故 $l=1;k=0,\eta=1$。因此

$$\begin{bmatrix}T_1\\T_2\end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix}T_1\\T_2\end{bmatrix}^{(0)} + \delta^{(2)}\begin{bmatrix}y_1\\y_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.9\\-0.8\end{bmatrix} + 0.144\times\begin{bmatrix}0.7\\0.9\end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix}0.9\\-0.8\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0.1\\0.13\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1.0\\-0.67\end{bmatrix}$$

2）隐节点

（1）隐节点的误差公式：

$$\delta'_i = y_i(1-y_i)\sum_l \delta_l T_{li}$$

在本题中，隐节点也有两个，故 $i=1,2$；输出节点有一个，故 $l=1$。因此，

$$\delta_{y_1}^{(1)} = 0.7\times(1-0.7)\times0.144\times1 = 0.03$$

$$\delta_{y_2}^{(1)} = 0.9\times(1-0.9)\times0.144\times(-0.7) = -0.01$$

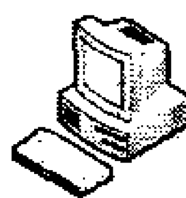
（2）权值修正公式：

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \eta'\delta'_i x_j$$

在本题中，输入节点有两个，故 $j=1,2$；隐节点也有两个，故 $i=1,2$。因此，

$$\begin{bmatrix}w_{11}\\w_{12}\end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix}w_{11}\\w_{12}\end{bmatrix}^{(0)} + \delta_{y_1}^{(1)}\times\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.2\\0.7\end{bmatrix} + 0.03\times\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.23\\0.7\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}w_{11}\\w_{12}\end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix}w_{21}\\w_{22}\end{bmatrix}^{(0)} + \delta_{y_2}^{(1)}\times\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.4\\0.3\end{bmatrix} - 0.01\times\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.39\\0.3\end{bmatrix}$$



3）一次计算和学习后的网络权值为

$$T_1 = 1,\quad T_2 = -0.67$$

$$W_{11} = 0.23,\quad W_{12} = 0.7,\quad W_{21} = 0.39,\quad W_{22} = 0.3$$

8.6 神经网络实现过程

8.6.1 确定系统框架

1. 完成对神经元网络的拓扑结构设计

(1) 神经元个数。

(2) 神经元网络层次。

(3) 网络单元的连接。

2. 确定神经元的作用函数和阈值

作用函数用得较多的有两种：阶梯函数和 S 型函数。

阈值的选取可为定值，如 $\theta_i = 0$ 或 $\theta_i = 0.5$，或者进行迭代计算。

8.6.2 学习样本

学习样本是实际问题中已有结果的实例，公认的原理、规则或事实。

学习样本分为两类：线性样本和非线性样本。

非线性样本要采用较复杂的学习算法，网络层次包含隐含单元(BP 模型)或增加输入节点(函数型网络)。

8.6.3 学习算法

对不同的网络模型采用不同的学习算法，但都以 Hebb 规则为基础。如对 perceptron(感知器)模型，采用 delta 规则；对 back-propagation(逆传播)模型，采用误差逆传播方法。

8.6.4 推理机

推理机是基于神经元的信息处理过程。

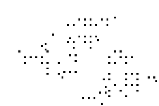
(1) 神经元 j 的输入：

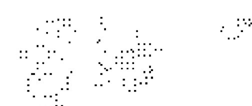
$$I_j = \sum W_{jk} \cdot O_k$$

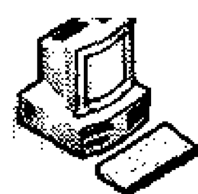
式中：W_{jk} 为神经元 j 和下层神经元 k 之间的连接权值；O_k 为 k 神经元的输出。

(2) 神经元 j 的输出：

$$O_j = f(I_j - \theta_j)$$







式中：θ_j 为阈值；f 为神经元作用函数。

8.6.5 知识库

知识库主要是存放各个神经元之间连接权值。由于上下两层间各神经元都有关系；用数组表示为(W_{ij})，i 行对应上层节点，j 列对应下层节点。

8.6.6 输入模式转换

实际问题的输入，一般是以一种概念形式表示，而神经元的输入，要求以$(-\infty,\infty)$间的数值形式表示。这需要将物理概念转换成数值。

建立两个向量集。

(1) 实际输入概念集：各输入节点的具体物理意义，一般采用表的形式。

(2) 神经元输入数值集：各输入节点的数值。

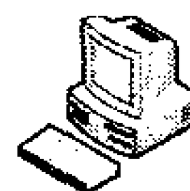
8.6.7 输出模式转换

实际问题的输出，一般也是以一种概念形式表示。而神经元的输出，一般是在$[0,1]$间的数值形式，这需要将数值向物理概念转换。

例 8-2 神经网络在旅游可持续发展能力评价中的应用。

旅游可持续发展是指在充分考虑旅游活动对经济、文化、自然资源和生态环境的作用和影响的前提下，努力谋求旅游业与自然、社会、文化和人类生存环境持续协调发展，提高旅游目的地人民的生活质量，同时保证不损害后代旅游者和旅游地居民满足其需求的可能性。因此，旅游可持续发展概念的核心在于要以旅游资源环境的持续为前提，以旅游经济持续为手段，以旅游人文资源持续为目的，使旅游人文资源、经济与旅游资源环境系统协调发展。所以，本例将上海旅游可持续发展系统理解为旅游经济、旅游环境、旅游人文资源、旅游地生活质量 4 个子系统相互作用、相互协调的复杂系统。

旅游可持续发展的目的就是追求经济增长，除了旅游业本身所带来的旅游外汇收入、旅游者购物收入、旅行社和宾馆饭店收入等，更多的是为相关行业带来经济效益。因此，“旅游经济协调发展”是上海旅游可持续发展的一个重要方面；可持续就是资源的持续性利用，所以上海旅游可持续发展评价指标的另一个方面是“人文资源保护发展”。既要考虑现在的需要，又要顾及子孙后代的利益，要对资源进行合理的利用和保护；旅游地环境的优劣是旅游者考虑旅游目的地的一个重要方面，所以，环境也是指标体系中不可遗漏的。社会是人的社会，旅游者来到上海最先感受到的就是上海的社会风尚和居民素质。另一方面，随着旅游点及相关设施的建设和改进，上海市民的生活质量也有了改变。因此，“生活质量促进发展”是上海旅游可持续发展指标体系的又一个方面。根据以上分析，得出上海旅游可持续发展能力评价指标体系如图 8-13 所示。



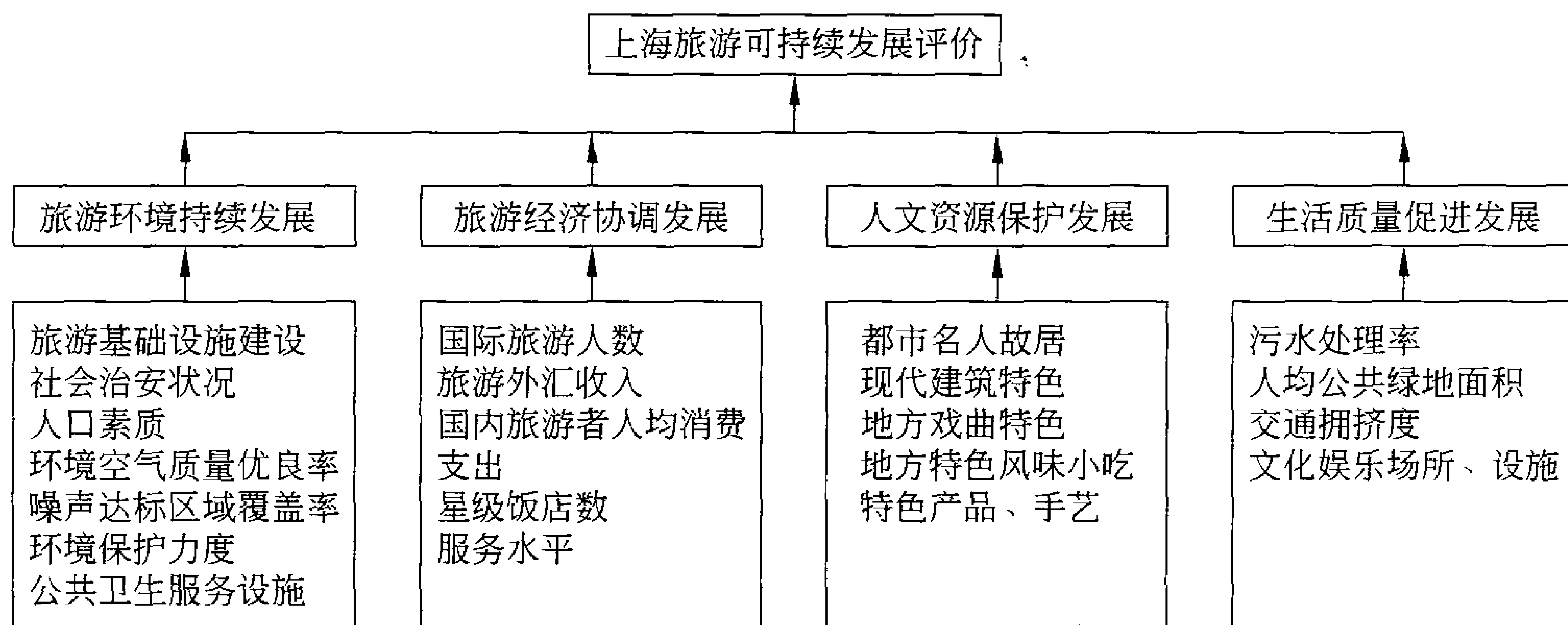


图 8-13　上海旅游可持续发展能力评价指标体系

数据调查分为两部分：第一部分来源于上海统计年鉴，获得指标体系中 11 个指标 1994 年至 2004 年的数据；第二部分通过调查问卷的形式，统计并数字化，作为指标体系中 10 个指标的数据。

在神经网络结构中，输入层和隐含层的个数会直接影响到神经网络的计算结果，当然并不是越多越好，因为节点过多会影响网络的收敛速度并加大噪声干扰。本例确定了 21 个指标，即有 21 个输入层节点；指标体系的第二级包含了 4 个方面，即有 4 个隐含层；而输出层只有 1 个，即上海旅游可持续发展能力。最大训练次数 50，训练误差 0.000 1，经过 33 次训练神经网络，输出结果为 0.679 2，即 2004 年上海旅游可持续发展能力评价得分为 0.679 2，介于“一般”和“较满意”之间，偏向一般。其他输出数据如表 8-1 所示。

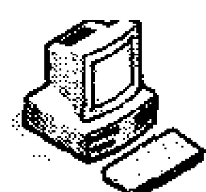
表 8-1　环境持续发展子系统输出结果

训 练 样 本	检 验 样 本
最大误差 deta_max = 0.006 5	最大误差 deta_max = 0.043 9
最小误差 deta_min = 2.970 6e−004	最小误差 deta_min = 0.014 0
平均误差 deta_aver = 0.002 6	平均误差 deta_aver = 0.028 4
方差 deta_std = 0.003 7	方差 deta_std = 0.015 0

上海旅游可持续发展能力评价得分为 0.679 2，处于较满意水平。虽然从分值来看，分数并不低，但是就上海旅游的现状来看，仍存在一些不足之处，有待弥补和改进。

例 8-3　利用 MATLAB 程序采用动量梯度下降算法训练 BP 网络。

训练样本定义如下。



输入矢量为

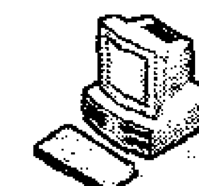
$$P=[-1,-2,3,1;-1,1,5,-3]$$

目标矢量为

$$T=[-1,-1,1,1]$$

解 本例的 MATLAB 程序如下：

```
close all
clear
echo on
clc
% NEWFF——生成一个新的前向神经网络
% TRAIN——对 BP 神经网络进行训练
% SIM——对 BP 神经网络进行仿真
pause
% 按任意键开始
clc
% 定义训练样本
% P 为输入矢量
P=[-1, -2, 3, 1; -1, 1, 5, -3];
% T 为目标矢量
T=[-1, -1, 1, 1];
pause;
clc
% 创建一个新的前向神经网络
net=newff(minmax(P),[3,1],{'tansig','purelin'},'traingdm')
% 当前输入层权值和阈值
inputWeights=net.IW{1,1}
inputbias=net.b{1}
% 当前网络层权值和阈值
layerWeights=net.LW{2,1}
layerbias=net.b{2}
pause
clc
% 设置训练参数
net.trainParam.show=50;
net.trainParam.lr=0.05;
net.trainParam.mc=0.9;
```



```
net.trainParam.epochs=1000;
net.trainParam.goal=1e-3;
pause
clc
% 调用 TRAINGDM 算法训练 BP 网络
[net,tr]=train(net,P,T);
pause
clc
网络训练的输出结果见图 8-14
% 对 BP 网络进行仿真
A=sim(net,P)
% 计算仿真误差
E=T-A
MSE=mse(E)
pause
clc
echo off
```

```
inputWeights =

    0.4230    0.5455
    0.6496   -0.4502
    0.9466   -0.1323


inputbias =

   -3.1819
    0.1254
    2.0838


layerWeights =

    0.8709    0.8338   -0.1795


layerbias =

    0.7873

Start  Paused: Press any key
```

图 8-14　网络训练的输出

网络训练的误差变化曲线、网络训练的误差分别见图 8-15、图 8-16。

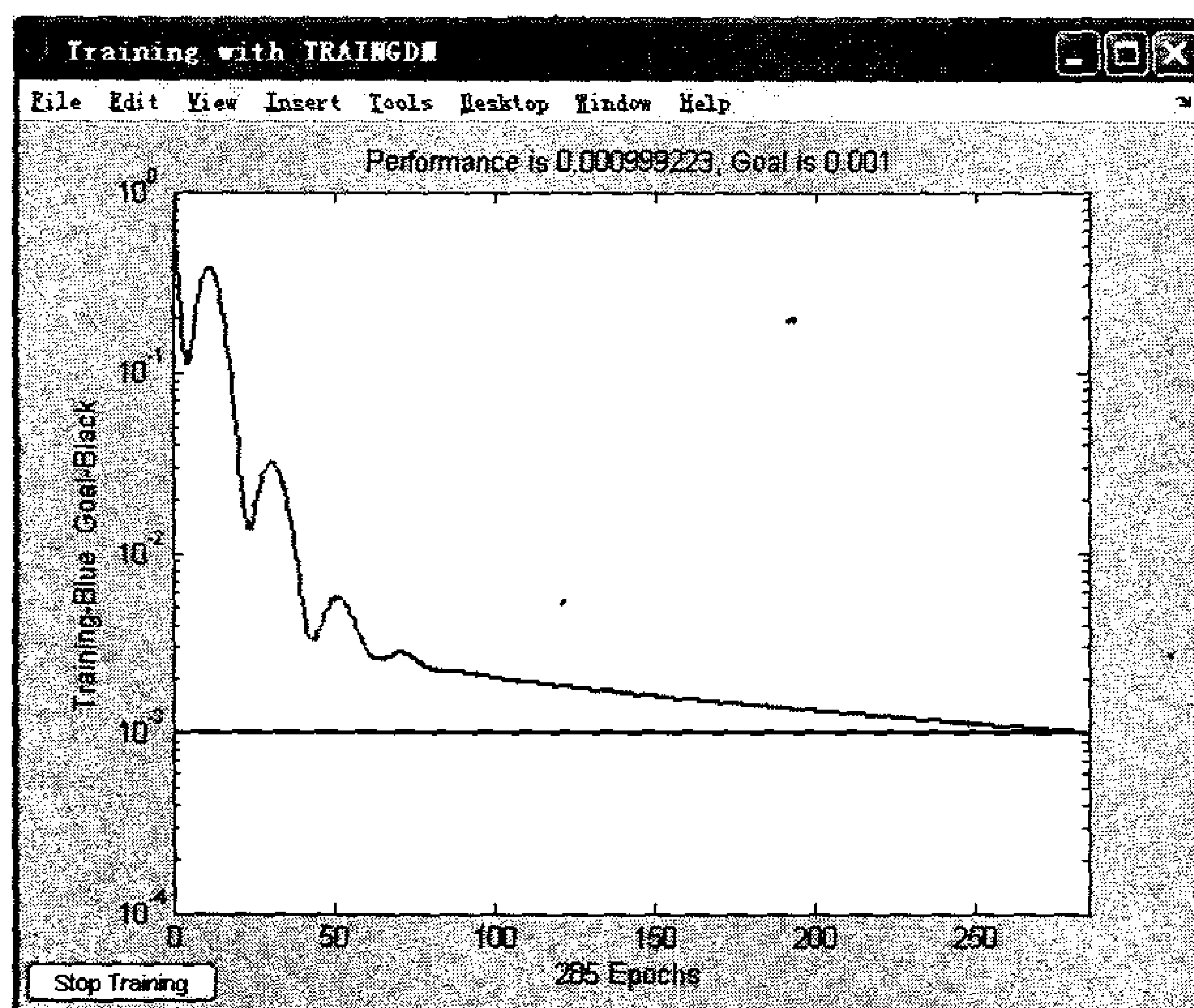


图 8-15　网络训练的误差变化曲线

```
Command Window

A =

   -0.9712   -1.0277    1.0329    0.9638

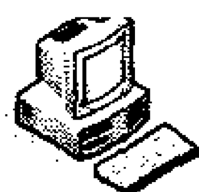

E =

   -0.0288    0.0277   -0.0329    0.0362


MSE =

  9.9922e-004
```

图 8-16　网络训练的误差



8.7 神经网络的容错性

前馈网络的容错性，从定性上讲，是指前馈网络的输出功能对网络中硬故障（如权值连接开路或短路、神经元输出固定型故障等）的容忍特性；从定量上讲，是指针对网络中特定的故障模型（包括硬故障类型、故障重数、故障分布特性等），前馈网络的输出功能（如模式分类或函数逼近等）仍保持正确的概率。目前，当前馈网络用于函数逼近时，其容错性通常由针对一定故障模型下，对所有训练样本，前馈网络输出逼近误差的均值和方差来定量表示。

8.7.1 容错性的研究内容

1. 容错性分析

容错性分析是指对于给定的前馈网络（指网络规模、神经元模型和权值参数均已给定）和样本集：

（1）分析在给定故障模型下输出功能仍保持正确的概率或输出误差的变化性能。

（2）分析在一定的性能要求下（如正确识别率应大于多少），允许前馈网络内部发生的故障模型的最坏情形。目前，大多数文献只针对第(1)方面内容开展理论或试验研究。

2. 容错性设计

容错性设计是指对于给定的样本和性能要求，通过选择合适的网络规模、神经元模型和训练方法或特定的容错方法，使得设计的网络：

（1）对设定的故障模型，既满足正常的性能要求，又有尽可能强的容错性。

（2）进一步，既能满足规定的性能和容错要求，又对设定的故障模型和/或其他非设定的故障模型具有尽可能大的容错性。目前，大多数文献还只是针对第(1)层次的要求来设计容错前馈网络。

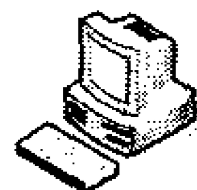
8.7.2 前馈网络容错性的分析方法

目前，对前馈网络容错性的分析主要有两种方法：一是理论分析方法，二是故障仿真测试方法。

1. 理论分析方法

对各种前馈网络的容错性进行理论上的分析，目前尚无统一的方法可循。从已有的文献来看，都是针对给定的前馈网络和特定的故障模型，用一定的理论方法（如概率统计方法），推导出前馈网络的输出功能变化规律的定量数学分析模型。

前馈网络容错性分析的理论方法的最大优点是建立了网络输出功能与故障模型在数



学上的直接联系。因而，这种方法一方面对于较大规模网络的容错性分析有其独特的优势；另一方面，也为实现容错前馈网络的可具有不同可靠度要求元件的筛选提供理论依据，从而可以用最经济的方案实现符合容错要求的网络。但目前，各种方法都是针对特定的前馈网络和特定的故障模型，因而其适用范围均有一定限制。

2. 故障仿真测试方法

故障仿真测试方法是指通过人为地假设在前馈网络中发生预期故障模型的故障，然后通过数字仿真方法来得到网络输出功能的变化特性，进而得到针对各种故障模型的网络输出功能变化的统计特性，用于评估网络的容错性大小。根据对设定故障模型的全部或部分故障进行仿真测试，故障仿真测试法又可分为穷举故障仿真测试法和抽样故障仿真测试法。目前，大多数学者采用穷举故障仿真测试法。

尽管用故障仿真测试法检测网络的容错性从方法上讲简单易行，且对给定的网络和故障模型无特殊的限制，但存在两个明显不足：①对于穷举故障仿真测试法，当网络规模较大时，计算量往往是很大的；②若采用抽样故障仿真测试法，则对各种故障模型，抽样方案怎样确定（如：抽样率取多少，抽样故障在网络层间和同层中的分布怎样），才能保证测试的精度，对此问题尚缺乏理论上的深入分析。

8.7.3　前馈网络容错性的设计方法

针对如何提高前馈网络的容错性问题，国内外学者已提出了多种不同的设计方法。根据各种方法得到的网络是否具备对故障的即时容错能力，可以将现有设计方法分为即时容错法和延时容错法。而从各种具体实施途径来看，又可将容错法划分为改进训练容错法（或称学习容错法）、冗余法、权值转移法等。

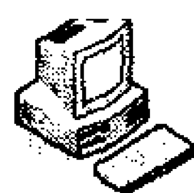
综合上述两种分类依据，下面就前馈网络的各种容错设计方法进行简要的介绍和评述。

1. 即时容错法

即时容错法是指用该法实现的网络，当内部发生故障时，不需要继续训练或网络重新构造等补充措施，在故障存在的情况下，网络输出功能仍保持正常或满足要求。根据实现途径不同，该法主要有改进训练容错法和冗余法。

2. 延时容错法

延时容错法是指当发现网络出现故障，网络功能不正常时，通过继续训练网络权值、重新构造网络或对故障部位的功能实现转移等方法使网络恢复正常功能。从现有文献看，根据实现的途径不同，延时容错法又有继续训练法、同构节点冗余重构法、权值转移法等。



3. 权值转移法

C. Khunasaraphan 等人提出前馈网络的一种自修复技术——权值转移法，来实现网络对权值连接和/或神经元故障的容错性，并提出该法实现的硬件结构。该法的基本思想是：①将发生连接故障的权值转移至以该连接作为输入的神经元的所有其他无故障输入的连接权值上；②对于神经元输出故障，则将其视为该神经元所有输出连接都发生故障的情形，并按①思想，将所有输出连接故障进行权值转移，使网络恢复正常功能。

例 8-4 疾病诊断的前馈神经网络的容错性研究。

这是一个识别脑出血和脑血栓两种疾病的诊断规则的应用实例，这个问题实际上是从大量已知患者病例（训练例子集）中找到这两类病的识别规则。

实际上只有两种类别：A. 脑出血；B. 脑血栓

为了作出判断，应当考虑如下几个方面的特征（属性）。

（1）病人的既往史，包括 a. 高血压（有 1，无 0）；b. 动脉硬化（有 1，无 0）。

（2）起病方式（快 1，慢 0）。

（3）局部症状，包括：

a. 瞳孔不等大（是 1，否 0）。

b. 语言障碍（是 1，否 0）。

c. 意识障碍（深度 1，轻度 0）。

d. 偏瘫（是 1，否 0）。

e. 两便失禁（是 1，否 0）。

（4）膝腱反射（活跃 1，不活跃 0）。

（5）病情发展（快 1，慢 0）。

上面是从 5 个方面 10 个特征来识别诊断患者到底得的是脑出血还是脑血栓。

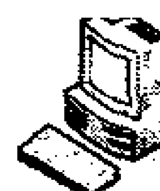
样本输入和输出见表 8-2。

表 8-2 样本输入和输出

样本输入										样本输出				
高血压	起病方式	瞳孔不等大	语言障碍	意识障碍	病情发展	动脉硬化	膝腱反射	偏瘫	两便失禁	编码				疾病名
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	脑出血
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	脑血栓

该样本设计成神经网络，如图 8-17 所示。

完成机器学习以后，对样本进行缺省条件输入，有如下 3 种情况：①缺 1 个条件的情况；②缺 2 个条件的情况；③缺 3 个条件的情况。



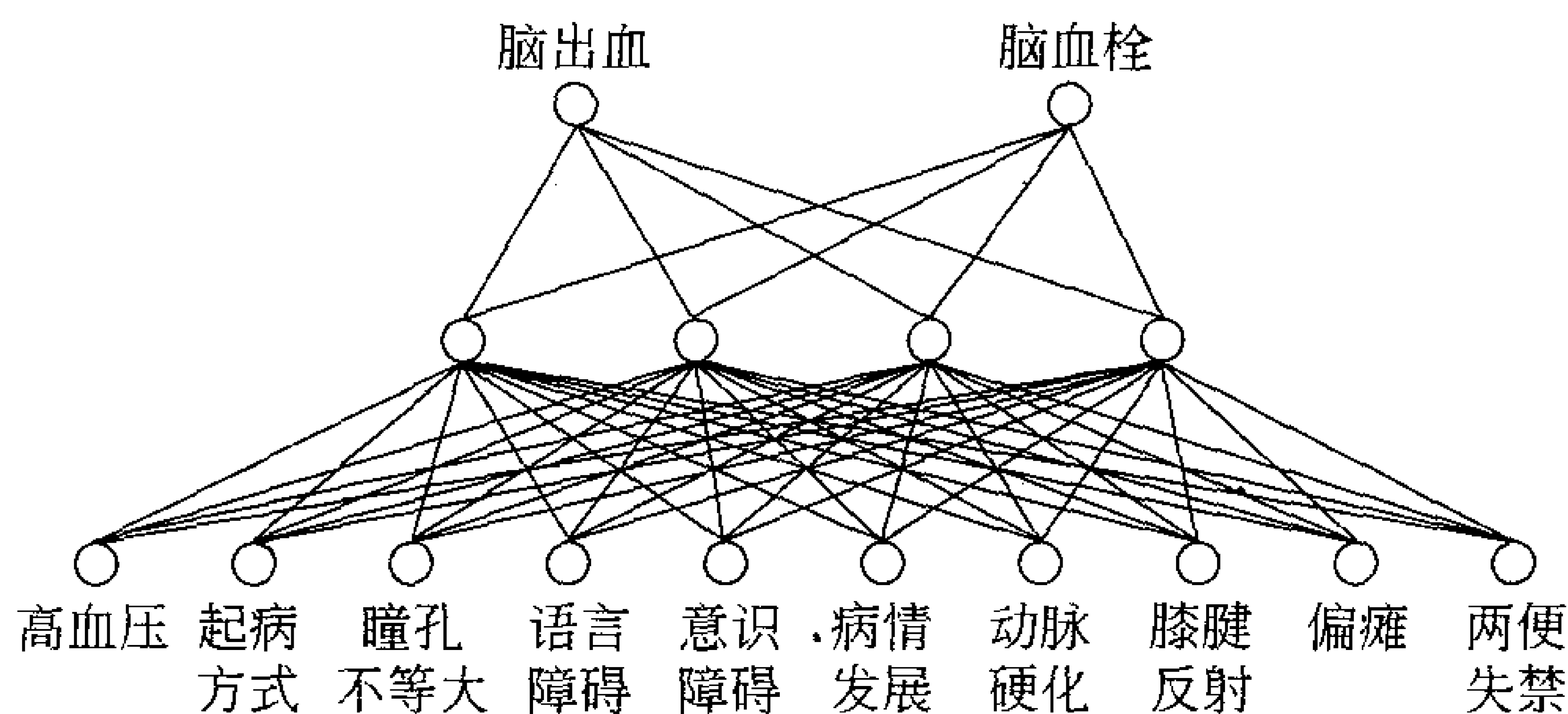


图 8-17　疾病样本神经网络图

推理结果见表 8-3

表 8-3　推理结果表

输入										输出		输出相近的情形
高	起	瞳	语	意	病	动	膝	偏	两	脑出血	脑血栓	
1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0.882 3	0.123 3	脑出血
0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0.934 3	0.030 0	脑出血
1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0.824 5	0.213 3	脑出血
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0.768 2	0.126 2	脑出血
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0.798 7	0.207 8	脑出血
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.037 1	0.904 3	脑血栓
1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0.943 2	0.035 0	脑出血
0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0.865 7	0.018 7	脑出血
1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0.909 1	0.038 5	脑出血
0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0.768 5	0.254 7	脑出血
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.324 2	0.675 5	脑血栓
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0.709 5	0.285 4	脑出血
1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0.664 3	0.356 8	脑出血
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0.675 4	0.357 0	脑出血
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0.445 3	0.557 6	脑出血，脑血栓

从计算结果中，可以看出容错效果很好。

第一种情况的第一例，对脑出血缺省起病方式条件时，输出结果仍然是脑出血(0.882 3)。

第二种情况的第五例，对脑血栓缺省高血压和起病方式的条件时，输出结果仍然是脑血栓(0.675 5)。

对第三种情况的第四例，输入脑出血和脑血栓的共同信息(高血压等)时，神经网络的输出是既靠近脑出血(0.445 3)又靠近脑血栓(0.557 6)，输出结论：该疾病是一个介于脑



出血和脑血栓之间的新品种。

本章小结

人们在筹建一个新系统或更新一个旧系统时，在制定规划或作决策时，总是期望能有好的结果，少有或没有差错，要尽量少担风险。因此，需要对未来的发展趋势和状况进行研究和估计。系统预测就是借助于对过去的探讨去推测、了解未来。系统预测的方法很多，神经网络是最近比较流行的预测方法，因为它能够反映系统的非线性而受到专家们的青睐。

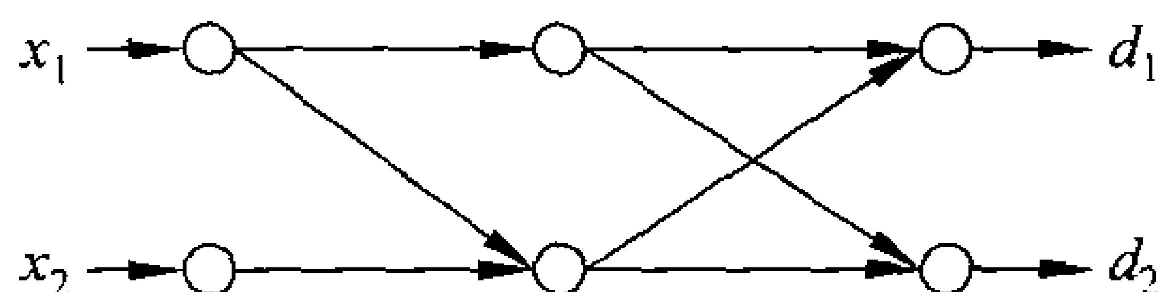
人工神经网络是在对人脑神经网络的基本研究的基础上，通过原始数据的处理和模型的建立，发现、掌握系统发展规律，对系统的未来状态做出科学的定量预测。突破了传统的以线性处理为基础的局限，标志着人们智能信息处理能力和模拟人脑智能行为能力的一大飞跃。近二十年来，神经网络的软件模拟得到了广泛研究和应用，发展速度惊人。美国的 Mathwork 公司推出的 MATLAB 软件包既是一种非常实用有效的科研编程软件环境，又是一种进行科学和工程计算的交互式程序，因此，本章在网络训练过程中使用的是 MATLAB 7.0 for Windows 软件。

思考题

1. 试论述神经网络的典型结构、常用的作用函数以及各类神经网络的基本作用，举例说明拟定结论。

2. 建立几种神经网络模型，研究这些神经网络模型的动力学性能和同步特性。

3. 某 BP 神经网络如下图。



其中：输入为$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix}$；期望输出为$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0.95 \\ 0.05 \end{bmatrix}$；

第一层权值矩阵为 $\boldsymbol{w}_1=\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}$；第一层阈值为$\boldsymbol{\theta}_1=\begin{bmatrix} -3 \\ 1 \end{bmatrix}$；

第二层权值矩阵为 $\boldsymbol{w}_2=\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$；第二层阈值为$\boldsymbol{\theta}_2=\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$。

传递函数均为 Sigmoid 函数，试训练该网络。

4. 谈谈学习系统预测方法（特别是神经网络方法）后的心得体会，你准备如何在你的学习中应用预测方法理论与知识解决问题（给出一到两个例子）？



参考文献

[1] 谭跃进. 系统工程原理[M]. 长沙：国防科学技术大学出版社，2003.

[2] 周德群. 系统工程概论[M]. 北京：科学出版社，2005.

[3] 孙东川. 系统工程引论[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[4] 许国志. 系统科学[M]. 上海：上海科技教育出版社，2004.

[5] 许国志. 系统科学与工程研究[M]. 上海：上海科技教育出版社，2001.

[6] 余晓钟. 成品油价格影响因素的 ISM 分析[J]. 石油化工技术经济，2002，(4).

[7] 唐幼纯等. BP 神经网络的设计实例. http://tieba.baidu.com/f?kz= 157156068，2009.

[8] 陈文伟. 决策支持系统教程[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[9] 陈建明，张仲义. 基于系统工程的系统分类及应用[J]. 系统工程学报，2000，(1).

[10] 李增伟. 系统工程在管理决策中的应用[J]. 管理决策，2005，19－21.

[11] 闫淑君. 项目管理模式选择的系统评价与决策[J]. 青海大学学报，2002，20(3)：68－70.

[12] 陈红，颜英秋，周伟. 公路网规划方案综合评价方法及应用[J]. 系统工程理论与实践，1999，19(6).

[13] 孔江. 城市建设评价指标体系与方法研究[D]. 昆明理工大学硕士论文. 2003.

[14] 吴望名，陈永义，黄金丽，陈图云，周开其，于康元. 应用模糊集方法[M]. 北京：北京师范大学出版社，1985.

[15] 钱学森，许国志，王寿云. 论系统工程(新世纪版)[M]. 上海：上海交通大学出版社，2007.

[16] 孙东川，林福永. 系统工程引论[M]. 第 2 版. 北京：清华大学出版社，2009.

[17] 汪应洛. 系统工程[M]. 第 3 版. 北京：机械工业出版社，2003.

[18] 刘普寅等. 模糊理论及其应用[M]. 长沙：国防科学技术大学出版社，1998.

[19] 吴祈宗. 系统工程[M]. 北京：北京理工大学出版社，2006.

[20] 谭跃进等. 系统工程原理[M]. 长沙：国防科学技术大学出版社，1999.

[21] 白思俊等. 系统工程[M]. 北京：电子工业出版社，2006.

[22] Satty T L. Decision Making—The Analysis Hierarchy and Network Processes(AHP/ANP)[J]. Journal of System Science and Systems Engineering，2004，1.

[23] Benjamin S Balnchard，Wolter J Fabrycky. 系统工程与分析[M]. 第 3 版. 北京：清华大学出版社，2002.

[24] 王众托编著. 系统工程引论[M]. 北京：电子工业出版社，2006.

[25] 高志亮，李忠良编著. 系统工程方法论[M]. 西安：西北工业大学出版社，2004.

[26] 赵新泉，彭勇行. 管理决策分析[M]. 北京：科学出版社，2008.

[27] 杨耀臣. 蒙特卡罗方法与人口仿真学. 合肥：中国科学技术大学出版社，1999.

[28] 唐幼纯，胡建鹏. 神经网络在旅游可持续发展能力评价中的应用[J]. 计算机工程与设计，2008，29(18)：4815-4818.